V. Langué

Expériences et astuces de la physique

SCIENCE POUR TOUS
ÉDITIONS DE MOSCOU

Victor Langué, candidat ès sciences physiques et mathématiques, dirige la chaire de physique à l'Institut de transport fluvial et maritime de Léningrad. Il est l'auteur de plus de 60 publications sur la physique du solide. Il est également connu comme écrivain de vulgarisation scientifique. Son ouvrage « Paradoxes et sophismes physiques » a soutenu trois éditions en U.R.S.S. et a été traduit en bulgare, roumain, allemand et japonais.

В. Н. ЛАНГЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ
ЗАДАЧИ НА СМЕКАЛКУ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА · 1974

Expériences et astuces de la physique

PAR

V. LANGUÉ

EDITIONS MIR · MOSCOU

Traduit du russe
par V. Polonski

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE 7

PROBLÈMES 13

Chez-soi (13). En promenade (18). Sur un lac (21). Pendant le voyage (22). Dans un laboratoire scolaire (24). A l'usine (29). Dans l'espace (31).

SUGGESTIONS 34

SOLUTIONS DES PROBLÈMES 42

На французском языке

© Издательство « Наука », 1974.

© Traduction française Editions Mir · 1977.

«Tout enseignement est un poids mort s'il n'inspire pas à l'élève l'initiative et le désir d'agir.»

N. Oumov.

PRÉFACE

Dans tout domaine où se déploie l'activité humaine que ce soit la science ou la technique, l'industrie ou l'agriculture, l'astronautique ou la médecine, la nécessité surgit de mesurer telle ou telle grandeur, la température de l'air ou la hauteur d'une montagne, le volume d'un corps ou l'âge des objets découverts lors de fouilles archéologiques, etc. Il arrive que pour mesurer on utilise des appareils ou des instruments spécialement prévus à cet effet. Ainsi, pour déterminer les dimensions linéaires d'un corps on peut employer une règle, un décamètre, un palmer, un pied à coulisse ; la température se mesure à l'aide d'un thermomètre ; pour connaître la masse on recourt à une balance. Dans ces cas les mesures sont dites directes ou immédiates. Or, il est beaucoup plus fréquent que la mesure voulue se calcule à l'aide des formules correspondantes à partir d'autres mesures dites alors mesures indirectes. Ainsi, pour obtenir la densité d'une matière on établit généralement la masse et le volume d'un corps composé de cette matière, puis on divise la première grandeur par la deuxième.

Le plus souvent les grandeurs se mesurent suivant des méthodes « usuelles » spécialement établies, dont on vient de citer des exemples (longueur et densité). Pourtant, dans certains cas, l'application des moyens ordinaires est incommode, voire impossible.

Imaginez qu'il faille déterminer le diamètre d'un capillaire, celui, disons, d'un thermomètre ordinaire. Le canal du tube capillaire est trop fin pour qu'on le mesure avec une règle. Qui plus est, la règle que vous avez à votre disposition est trop grossière pour être employée à cet effet. Que faire alors? C'est justement le cas où il serait opportun de remplacer une mesure directe par une mesure indirecte et où les procédés sont nombreux et variés. L'un d'eux sera décrit au cours de la résolution du problème n° 89 que vous trouverez plus loin. Il n'est pas non plus toujours possible de mesurer la densité par la méthode courante. En effet, si nous voulons connaître la densité moyenne de la matière d'une planète nous nous heurtons à une difficulté capitale : la planète ne se prête pas à la pesée. Il faut donc procéder par des biais et les solutions des problèmes nos 117 et 121 donnent la description de deux méthodes appropriées.

Certains problèmes de ce recueil nécessitent l'utilisation des appareils et d'un matériel qui semblent non appropriés à ce but. Or, si vous en faites un usage judicieux, vous serez en mesure de résoudre un problème. Mais si vous ne parvenez pas à le résoudre, consultez d'abord la partie « Suggestions » ; ce n'est qu'ensuite si la solution ne nous vient toujours pas à l'esprit, qu'il faut aller chercher la réponse dans la partie « Solutions ». Lorsque vous avez réussi à résoudre le problème vous-mêmes, comparez encore votre réponse à celle donnée dans le livre ; il se peut que la vôtre soit plus simple et plus élégante, ce qui vous apportera une satisfaction particulière.

On trouve également dans le recueil des problèmes qui n'imposent pas le calcul d'une grandeur quelconque. Il faut alors seulement trouver le moyen de réaliser l'opération proposée. Ces problèmes sont associés à ceux du premier type

par ce qu'ils ont d'inusité soit dans les données initiales, soit dans le choix du matériel à utiliser. (En toute justice, il faut dire que l'étrangeté de certains problèmes n'est qu'apparente. Par exemple, la densité moyenne de la matière constitutive de la Terre a été déterminée précisément de la façon décrite dans la solution du problème n° 121.)

Bien que tous les problèmes aient un caractère expérimental, il importe d'indiquer la voie *à suivre* correcte en principe. On suppose aussi que la précision des appareils et des instruments mentionnés dans les problèmes est parfaite ; sauf mention du contraire, on peut faire appel à des « moyens de fortune ». Ainsi, on suppose qu'il se trouvera toujours chez vous un verre ou une bobine de fil, de l'eau, etc.

Les objets dont on dispose ne permettent parfois qu'une détermination approchée de la grandeur à mesurer, mais il est des cas où même des résultats approximatifs ont une grande valeur. On sait, par exemple, que de nos jours les longueurs des ondes lumineuses se mesurent avec une précision surprenante (rappelons que le Système International (SI) stipule qu'un mètre correspond à la longueur d'un segment qui compte 1 650 763,73 longueurs d'une des ondes du spectre de crypton, ou plutôt de son isotope à nombre de masse 86). Cependant les expériences assez rudimentaires auxquelles procéda le physicien anglais Thomas Young en 1802 pour déterminer pour la première fois la longueur des ondes lumineuses étaient d'une importance capitale du fait que jusque-là on ne savait même pas de quel ordre était cette grandeur.

Les données de la plupart des problèmes semblent artificielles et il y a peu de chances que vous ayez l'occasion de les rencontrer dans la vie réelle. Mais qui sait? On ne saurait tout prévoir

et la vie peut réserver toutes sortes de surprises. L'histoire de la science prouve avec éloquence que le savant doit être souvent très ingénieux pour trouver divers moyens indirects, parfois fort compliqués en vue de mesurer les grandeurs et d'analyser les phénomènes. Il suffit de citer à titre d'illustration les cas concernant la détermination de la charge d'électron, de la composition chimique des étoiles, de la structure du noyau atomique. Dans chacun de ces cas les savants étaient poussés par l'imagination, qualité fort précieuse lorsqu'il s'agit d'explorer la nature. Il vous serait donc à vous aussi d'une grande utilité d'exercer votre sagacité sur des exemples relativement simples pour pouvoir faire face à des cas bien plus compliqués.

L'ouvrage que nous proposons à l'attention du lecteur a peu de commun avec un recueil de problèmes scolaires ; les problèmes qu'il propose peuvent renvoyer aux branches les plus variées de la physique. C'est pourquoi les problèmes sont classés en fonction des circonstances qui déterminent l'exécution du travail proposé. Dans chaque section, les problèmes sont classés par ordre de difficulté croissante, bien qu'à ce propos l'auteur ne prétend nullement que son opinion doive aussi prévaloir pour le lecteur.

La plupart des problèmes qui suivent sont inédits, mais certains d'entre eux ont été empruntés à des recueils déjà publiés.

Le livre s'adresse en premier lieu aux élèves des dernières classes de l'enseignement secondaire qui possèdent déjà des connaissances solides en physique, mais ceux qui viennent d'aborder l'étude de ce domaine remarquable de la science pourront également venir à bout de nombreux problèmes. Il nous semble que l'ouvrage soit également profitable aux enseignants de l'école secondaire, pour composer, par exemple, des questionnaires de physique récréative.

Certains problèmes nécessitent l'utilisation d'aide-mémoire relatifs à des grandeurs physiques. La plupart des renseignements indispensables sont fournis par les annexes des recueils scolaires de problèmes de physique mais parfois il faut aussi consulter des tableaux plus détaillés.

Profitant de l'occasion, l'auteur exprime sa gratitude à A. Irissov et M. Bloudov pour la révision du livre, pour leurs critiques bienveillantes et constructives, ainsi qu'à A. Rymkévitch et T. Langué pour leurs conseils précieux.

L'Auteur

Moscou 1976

PROBLÈMES

CHEZ-SOI

1. On vous propose de déterminer la densité du sucre. Comment le faire en ne disposant que d'un gobelet gradué s'il faut procéder avec du sucre cristallisé?

2. A l'aide d'un poids marqué de cent grammes et d'une règle graduée déterminer la masse approchée d'un corps si elle ne se distingue que peu de celle du poids. Comment faire si au lieu d'un poids on dispose d'un jeu de monnaies?

3. Comment calculer le volume d'une casserole en utilisant une balance et un jeu de poids marqués?

4. Un verre cylindrique est rempli d'un liquide jusqu'aux bords. Diviser le contenu du verre en deux parties égales à l'aide d'un vase de forme différente et de dimensions un peu plus petites.

5. Pour se détendre et prendre un peu d'air deux garçons se tenaient sur un balcon. Comme ils n'avaient rien à faire, ils cherchaient le moyen de savoir sans ouvrir les boîtes laquelle contenait le moins d'allumettes.

Et d'après vous, comment faut-il procéder?

6. Comment trouver le centre de gravité d'un bâton lisse sans aucun instrument?

7. Mesurer le diamètre d'un ballon de football avec une règle *rigide* (par exemple, en bois).

8. Comment trouver le diamètre d'une petite bille à l'aide d'un gobelet gradué?

9. On doit connaître le plus exactement possible le diamètre d'un fil métallique relativement fin, ne disposant à cet effet que d'un cahier d'écolier quadrillé et d'un crayon.

Que faut-il entreprendre dans ces conditions?

10. Un récipient de forme rectangulaire contient de l'eau où flotte un corps. Employez seulement une règle graduée pour déterminer la masse de ce dernier.

11. Soient donnés une aiguille à tricoter en acier et un gobelet gradué contenant de l'eau. Que faut-il faire pour déterminer la densité d'un morceau de bouchon en liège?

12. Dites comment établir à l'aide d'une seule règle la densité du bois d'un petit bâton qui flotte dans l'eau d'un étroit récipient cylindrique.

13. Un bouchon de verre est creux à l'intérieur. Déterminer le volume de la cavité sans briser le bouchon. Peut-on le faire avec une balance, un jeu de poids marqués et un récipient contenant de l'eau?

14. On a une tôle de fer fixée au plancher, un bâton en bois et une règle. En utilisant seulement ces objets trouver une méthode pour déterminer le coefficient de frottement du bois sur le fer.

15. Dans une chambre éclairée par une lampe électrique établir laquelle de deux lentilles convergentes est la plus puissante. On n'a besoin pour cela d'aucun appareil spécial. Indiquer le moyen de résoudre le problème.

16. On dispose d'une lentille convergente et d'une lentille divergente. Comment indiquer sans aucun appareil laquelle de ces deux lentilles est la plus puissante?

17. Un long corridor sans fenêtres est éclairé par une lampe électrique. On peut l'allumer et l'éteindre en actionnant un interrupteur placé près de la porte d'entrée. C'est incommode pour celui qui sort: pour atteindre cette porte, il doit franchir le corridor dans l'obscurité. D'ailleurs, celui qui entre est mécontent lui aussi : le corridor une fois passé, il laisse la lumière dès lors inutile.

Ne peut-on imaginer un schéma permettant d'allumer et d'éteindre la lampe à partir des extrémités opposées du corridor?

18. Pour mesurer la hauteur d'une maison on propose d'utiliser une boîte de conserves vide et un chronomètre. Pourriez-vous vous acquitter de cette tâche? Que faut-il faire à cet effet?

19. Comment trouver la vitesse de l'eau qui s'écoule d'un robinet en n'utilisant qu'une boîte cylindrique, un chronomètre et un pied à coulisse?

20. Supposons qu'il faut remplir d'eau un grand bac de capacité connue à l'aide d'un flexible muni d'un embout cylindrique. Vous voulez savoir le temps que peut prendre cette opération plutôt ennuyeuse. Ne peut-on pas le calculer en usant seulement d'une règle?

21. Un robinet mal fermé laisse couler un mince filet d'eau. Comment procéder pour déterminer la vitesse de l'eau et son débit en n'utilisant qu'une règle?

22. On propose de déterminer l'accélération de la gravité en observant un filet d'eau que laisse échapper un robinet mal fermé.

Comment le faire en recourant à une règle, à un récipient de capacité connue et à une montre?

23. Comment déterminer la pression dans un ballon de football avec une balance sensible et une règle?

24. On donne une lampe électrique grillée. Que faut-il faire pour déterminer la pression à l'intérieur de cette lampe à l'aide d'un récipient cylindrique contenant de l'eau et d'une règle graduée?

25. Essayez de résoudre le problème précédent en employant une casserole pleine d'eau et une balance munie d'un jeu de poids marqués.

26. On donne un tube de verre étroit soudé à l'une de ses extrémités. Le tube contient de

l'air séparé de l'air ambiant par une colonne de mercure. On dispose également d'une règle graduée en millimètres. Déterminez la pression atmosphérique.

27. Comment déterminer la chaleur de vaporisation de l'eau avec un frigidaire domestique, une casserole de capacité inconnue, une montre et le brûleur d'une cuisinière à gaz à flamme régulière? On admet que la chaleur spécifique de l'eau est connue.

28. Dehors, il neige, alors que la chambre est bien chauffée. Dommage qu'on n'ait pas de thermomètre pour mesurer la température. Par contre, on a une batterie de chauffage central, un voltmètre très précis et un ampèremètre tout aussi précis, du fil de cuivre à profusion, ainsi qu'un aide-mémoire détaillé. Ne peut-on pas mettre en œuvre tous ces objets pour mesurer la température de la chambre?

29. Comment résoudre le problème précédent si on n'a pas d'aide-mémoire, mais si par contre on peut utiliser un réchaud électrique et une casserole contenant de l'eau?

30. Une fille demande à son père qui est en train de noter l'affichage du compteur électrique la permission d'aller se promener. Le père la laisse partir mais la prie de rentrer exactement dans une heure. Comment pourra-t-il établir la durée de l'absence de la fillette sans recourir à une montre?

31. Les indications de la polarité de votre aimant en fer à cheval se sont effacées. Les méthodes permettant de distinguer dans un aimant le pôle Nord du pôle Sud sont nombreuses, certes! Mais on vous propose de le faire avec un ... téléviseur. A vous de dire comment!

32. Le problème n° 17 est bien connu, puisqu'on le retrouve dans de nombreux recueils. Or, voici une tâche analogue mais plus complexe.

Imaginez un schéma permettant de brancher et de débrancher une lampe ou tout autre appareil alimenté par un réseau électrique à partir d'un nombre *quelconque* de points variés.

33. Si sur le plateau tourne-disque d'un électrophone couvert de drap on place un dé en bois près de l'axe de rotation, il tourne avec le disque. Mais si le dé est placé loin de l'axe, il est généralement rejeté.

Trouvez le coefficient de frottement du bois sur le drap en utilisant seulement une règle.

34. Elaborez une méthode permettant de déterminer le volume d'une chambre avec un fil fin assez long, une montre et un plomb.

35. Pour enseigner la musique et le ballet, pour entraîner les sportifs et pour certains autres objectifs on emploie souvent un métronome, instrument émettant des sons secs périodiques (battements). La période d'oscillation est réglée au moyen d'une massette se déplaçant sur une tige graduée oscillante.

Comment, si on ne l'a pas fait à l'usine, graduer en secondes l'échelle du métronome en se servant d'un fil, d'une bille en acier et d'un décamètre?

36. La massette d'un métronome à tige non graduée (voir le problème précédent) doit être réglée de façon que la période d'oscillation soit d'une seconde. A cet effet vous pouvez utiliser une longue échelle, un morceau de brique et un décamètre.

Comment arranger tous ces objets pour remplir la tâche?

37. On donne un parallélépipède de bois rectangulaire dont l'une des arêtes est sensiblement plus longue que les deux autres. Utiliser seulement une règle pour déterminer le coefficient de frottement du barreau sur la surface du plancher d'une chambre.

38. Deux sphères creuses de même poids et de même volume sont peintes de la même couleur qu'on ne voudrait pas égratigner. L'une des sphères est en cuivre et l'autre en aluminium.

Comment faire pour savoir le plus simplement possible laquelle des deux sphères est en aluminium et laquelle en cuivre?

39. Les amateurs préfèrent un café fait de grains fraîchement moulus. Si autrefois cette opération se faisait à la main, de nos jours les moulins à café sont actionnés par un petit moteur électrique. Ces moulins se présentent le plus souvent sous la forme d'un cylindre clos.

Comment déterminer le sens de rotation de son moteur sans démonter l'appareil?

40. Que faut-il faire pour trouver le poids d'un corps à l'aide d'une mire graduée rigide et homogène et d'un bout de fil de cuivre pas trop épais? On peut utiliser également un aide-mémoire des grandeurs physiques.

41. Calculer le rayon d'un miroir sphérique (ou le rayon de courbure d'une lentille concave) à l'aide d'un chronomètre et d'une bille d'acier de rayon connu.

EN PROMENADE

42. Un homme adulte doit passer du bord gauche d'un ruisseau au bord droit; un garçon doit le traverser dans le sens opposé. De chaque côté il y a une planche, chacune étant légèrement plus courte que la distance d'un bord à l'autre. Comment faire pour qu'ils puissent tous les deux continuer leur chemin?

43. Comment dans certains cas mesurer à l'aide d'un chronomètre la longueur d'un éclair d'après la durée du tonnerre?

44. On frappe sur une cloche suspendue à un poteau à intervalles réguliers d'une seconde. Peut-on déterminer la vitesse du son dans l'air en observant les coups portés sur la cloche et en écoutant les sons ainsi émis si l'on ne dispose pour les mesures que d'un décamètre?

45. Que faut-il faire par une journée ensoleillée pour établir la hauteur d'un arbre sans y grimper en utilisant seulement une règle?

46. Aux carrefours de certaines villes de l'U.R.S.S. sont placés des dispositifs électroniques pour calculer et afficher sur un tableau lumineux la vitesse que doivent avoir les véhicules pour arriver au carrefour suivant avec le feu vert. Dans les cas courants, les affichages successifs du tableau sont de 45 km/h, 50 km/h, 55 km/h et enfin 60 km/h, après quoi le tableau s'éteint, car les rues sont peu nombreuses où la vitesse autorisée peut dépasser 60 km/h.

Comment déterminer à l'aide d'une montre la distance jusqu'au feu suivant en se tenant à un carrefour et en observant les affichages du tableau?

47. A la patinoire deux garçons veulent comparer leurs masses. Comment doivent-ils s'y prendre s'ils ne disposent que d'un décamètre?

48. Vous vous tenez un soir au bord d'une petite rivière sur le bord opposé de laquelle un poteau porte un réverbère. Quel sera le procédé pour établir la distance au poteau et la hauteur de ce dernier si pour cela on vous propose d'utiliser une petite mire en bois et un décamètre?

49. Déterminer la vitesse initiale d'une balle tirée par un pistolet-jouet en n'employant qu'un décamètre.

50. Comment résoudre le problème précédent si au lieu d'un décamètre il faut utiliser un chronomètre?

51. Que faut-il faire pour établir à l'aide d'un décamètre de combien la vitesse d'une balle

lancée par un garçon est supérieure à la vitesse d'une balle lancée par une fille?

52. Vous voulez connaître la largeur d'une rivière en pas. Comment s'y prendre pour l'obtenir à l'aide d'un brin d'herbe, tout approximative que soit alors la grandeur obtenue?

53. Pour déterminer la direction du méridien magnétique on vous propose d'utiliser un verre d'eau, une pincée de salmiac (NH_4Cl), des ciseaux, une bobine de fil de cuivre, une petite plaque de zinc et un bouchon de liège. Comment à l'aide de ce jeu d'objets s'acquitter de cette tâche?

54. Imaginez-vous que pour trouver la hauteur d'une tour ou de tout autre édifice on vous a fourni une soucoupe contenant du mercure, un rapporteur, un plomb et un fil. Pourrez-vous exécuter la tâche si vous connaissez les dimensions de votre corps?

55. Comment déterminer la hauteur d'une montagne à l'aide d'un réchaud, d'une casserole contenant de l'eau et d'un thermomètre précis?

56. Mesurer l'intensité d'une source lumineuse de laquelle on ne peut pas s'approcher. A cet effet on dispose d'un appareil servant à mesurer les éclairements (luxmètre) et d'un décamètre. Donner la description de l'expérience.

57. Supposons que vous vous trouviez sur une plate-forme tournante, comme il en existe, par exemple, dans certaines fêtes foraines. La plate-forme étant couverte de tous les côtés, les objets qui l'entourent sont invisibles. Vous voulez connaître le sens de sa rotation. Comment le faire à l'aide d'une petite bille en acier?

58. Un observateur qui se tient près d'une voie ferrée voit passer devant lui un train électrique qui émet un signal prolongé.

Si son oreille est assez juste, il peut dire avec une précision suffisante et sans aucun appareil quelle est la vitesse du train: il suffit de connaître la vitesse du son dans l'air à cet instant.

Essayez d'expliquer comment il va procéder.

SUR UN LAC

59. Montrer sans aucun appareil que la tension superficielle de l'eau de savon est inférieure à celle d'une eau pure.

60. Par un temps calme deux amis sont allés se promener sur un lac dans des canots de forme et de dimensions parfaitement identiques. Tout en canotant, ils ont décidé de faire une épreuve de vitesse. Pour égaliser les chances, ils ont distribué la charge de façon à rendre égal le poids des deux canots.

Comment y parvenir s'ils n'utilisent qu'une longue corde qu'ils avaient avec eux?

61. Un homme voudrait définir la masse du canot dans lequel il se tient. Peut-il le faire s'il connaît sa propre masse mais n'a rien d'autre qu'une longue corde?

62. Après avoir passé d'une rive du lac où se trouvait leur station à l'autre, des touristes décidèrent en regardant l'heure qu'il fallait prendre un peu de repos. Le temps était calme et ils entendaient très bien les émissions transmises par le centre de radiodiffusion de la station, si bien qu'ils purent entendre les dernières nouvelles en débranchant leur transistor. Ensuite, l'un des touristes dit que la station ne se trouvait guère qu'à trois kilomètres. Comment s'y est-il pris pour déterminer cette distance?

63. Un homme grenouille doit déterminer la profondeur du lac. Par malheur, il ne possède aucun instrument si ce n'est une éprouvette graduée cylindrique. Il a réussi pourtant à remplir la tâche. Comment a-t-il pu le faire?

Peut-on réaliser la tâche si l'on remplace l'éprouvette cylindrique par une éprouvette conique?

64. En achetant dans un magasin du fil de canne à pêche en capron un pêcheur a oublié de se renseigner sur la charge que ce fil pourrait subir. Pourtant, après un moment de réflexion, il a imaginé le moyen de déterminer cette grandeur à l'aide d'un poids marqué de 1 kg et d'un rapporteur.

Essayez vous aussi de résoudre ce problème et de dire comment le pêcheur a dû procéder.

65. Le pêcheur pourra-t-il déterminer la résistance du fil de canne à pêche avec un poids marqué de 1 kg et un décamètre?

66. Le même pêcheur a voulu trouver la charge de rupture (relation entre l'effort de rupture et la section transversale qu'on appelle également résistance à la rupture) du matériau du fil de canne à pêche en procédant avec un bout de fil de canne à pêche de longueur et de diamètre donnés, un petit poids marqué et un chronomètre.

Comment faut-il monter l'expérience?

67. Une pierre est jetée dans un lac à eau calme. Que faut-il faire pour déterminer la portée du jet à l'aide d'un mètre et d'un chronomètre?

PENDANT LE VOYAGE

68. Comment déterminer par un temps calme la vitesse de chute des gouttes de pluie d'après les traces qu'elles laissent sur les vitres d'un train en mouvement?

Pour résoudre ce problème employer seulement une montre et un rapporteur.

69. Que faut-il faire pour définir avec une règle graduée la vitesse de la chute des gouttes de pluie d'après les traces qu'elles laissent par

un temps calme sur les vitres latérales d'une voiture en mouvement?

70. Pendant un certain temps le mouvement d'un train qui démarre d'une station est uniformément accéléré. Indiquez un moyen pour calculer l'accélération pendant cette période à l'aide d'un fil, d'un poids de cent grammes et d'une règle graduée.

71. Comment résoudre le problème précédent si au lieu de la règle on utilise un dynamomètre?

72. Même problème mais la règle est remplacée par un rapporteur?

73. Un compteur de tours des roues précis et un thermomètre pour la mesure de la température de l'air extérieur sont installés dans la motrice d'un train électrique de banlieue.

Comment les agencer pour déterminer le coefficient de dilatation linéaire du métal des roues?

74. Supposez que vous parcouriez en voiture un secteur de route horizontal. Comment calculer la valeur approchée du coefficient de la résistance au mouvement de la voiture en n'utilisant que les appareils qu'elle porte?

75. Que faut-il faire pour établir la pente d'une route en disposant d'une petite barre de bois et d'un dynamomètre?

76. Comment déterminer les signes des bornes de la batterie d'accumulateurs d'une automobile en se servant de la baladeuse de la trousse de chauffeur, d'un bout de fil métallique et d'une boussole?

77. Comment réaliser la tâche précédente si vous n'avez que deux fils conducteurs et un verre d'eau?

78. Comment résoudre le problème n° 76 en disposant de deux conducteurs de cuivre et d'une pomme de terre crue?

79. On a prié un automobiliste de déterminer la pente de la route. A cet effet on l'a muni d'un cerceau et d'un chronomètre. Que doit-il entreprendre?

DANS UN LABORATOIRE SCOLAIRE

80. Soient deux pendules. La période d'oscillation de l'un d'eux est connue. Quel est le moyen le plus simple pour déterminer la période de l'autre pendule?

81. Parmi plusieurs sortes de papier filtre il faut choisir celle dont les pores sont les plus fins. Comment le faire sans aucun appareil?

82. Dans un tiroir de table il y a deux barreaux d'apparence absolument identique. L'un d'eux est en fer doux, l'autre est en acier aimanté. Comment en n'utilisant que ces deux barreaux distinguer l'aimant du fer simple?

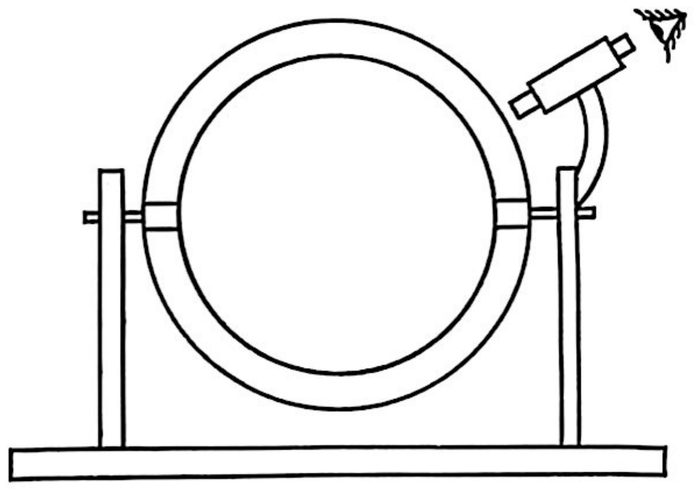
83. Que faut-il faire pour définir à l'aide d'une balance et d'un gobelet gradué si une bille d'aluminium est pleine ou si elle a à l'intérieur une cavité remplie d'air?

Peut-on par un moyen quelconque établir si cette cavité est au centre ou si elle est déplacée vers la surface?

84. La figure 1 représente un appareil peu connu inventé par le physicien américain Arthur Compton. Un tube de verre en forme d'anneau (tore) environ d'un mètre de diamètre est rempli d'eau où se trouvent des particules en suspension. On ne touche pas au tore tant que l'eau à l'intérieur ne se calme pas définitivement. Puis on le tourne brusquement de 180° pour observer au microscope les particules et établir si le liquide se déplace le long de l'axe du tore et si oui, dans quelle direction.

Comment définir la direction des points cardinaux à l'aide de ce dispositif?

Fig. 1

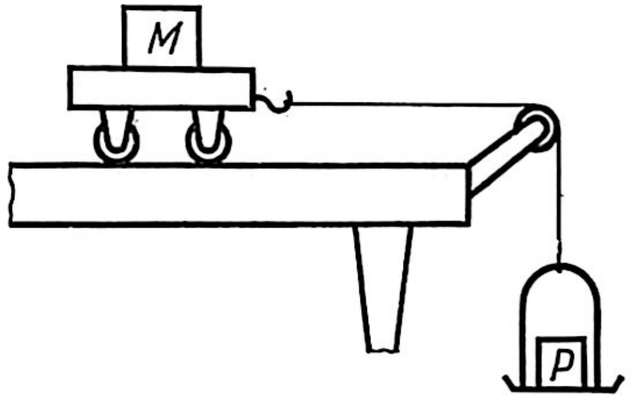


85. L'un des deux matras en verre sphériques parfaitement identiques contient de l'eau alors que l'autre contient de l'alcool. Les matras sont rendus hermétiques. En disposant d'une lampe de bureau comment apprendre sans ouvrir les matras lequel d'entre eux contient de l'eau et lequel de l'alcool?

86. Utiliser des poids marqués, un chronomètre et une installation schématisée sur la figure 2 pour calculer le plus simplement possible la masse du corps M.

87. Deux bobines sont montées sur un noyau fermé en fer. Comment déterminer le nombre de spires de chacune d'elles si on n'a à sa disposition qu'une source de courant alternatif, une pelote de fil métallique isolé et un voltmètre à plusieurs échelles très sensible?

Fig. 2



88. On désire connaître la masse et la longueur d'un conducteur de cuivre de la bobine d'un électro-aimant sans débobiner le fil. Peut-on y parvenir en utilisant une source de courant, un voltmètre, un ampèremètre et un palmer?

89. Comment déterminer le diamètre du canal d'un tube capillaire homogène en verre, par exemple celui d'un thermomètre médical usuel, à l'aide d'une règle, d'une poire en caoutchouc, d'une balance précise munie d'un jeu de poids marqués et d'une goutte de mercure?

La règle est un instrument trop grossier pour qu'on puisse l'utiliser dans la mesure directe du diamètre.

90. Pour mesurer la vitesse d'une balle de fusil un expérimentateur ne dispose que d'un moteur électrique à vitesse de rotation donnée, de deux disques de carton, de colle, d'une règle et d'un rapporteur.

Quel doit être l'agencement de cette collection d'objets?

91. On se propose de déterminer le poids d'un corps en utilisant un trépied, un ressort, une règle et un poids marqué unique. Comment peut-on le faire?

92. Soient une planche de bois, une barre de même matériau et une règle. Etablissez une méthode pour déterminer le coefficient de frottement du bois sur le bois en n'utilisant que ces objets.

93. Comment déterminer le coefficient de frottement d'une barre sur un plan incliné en utilisant un dynamomètre? La pente du plan est constante et pas très grande de façon que la barre ne glisse pas si on ne lui applique pas une force extérieure.

94. Pour établir la masse des corps il est d'usage de se servir d'une balance et d'un jeu de poids marqués. Mais comment faire si on n'a

pas de balance? L'un des moyens permettant de poser un corps sans recourir à une balance a été décrit dans le problème n° 86. Maintenant il faut étudier une autre variante, du fait qu'on ne possède qu'un poids marqué et que le dispositif représenté sur la figure 2 est remplacé par une pelote de cordon fin mais solide, une poulie légère et un chronomètre.

95. Que faut-il faire pour trouver la masse d'une petite barre d'acier à l'aide d'un réchaud à alcool, d'un bocal d'eau, d'un calorimètre, d'un thermomètre et d'un gobelet gradué? On peut également utiliser un aide-mémoire de physique. La masse du calorimètre et son matériau sont connus.

96. Comment déterminer approximativement la température d'une barre d'acier fortement chauffée à l'aide des objets donnés dans le problème précédent si le thermomètre est prévu pour la mesure des températures ne dépassant pas 100 °C?

97. Une neige humide est un mélange d'eau et de cristaux de glace. Cherchez le moyen de déterminer la teneur relative en glace de la neige humide à l'aide d'une balance sans poids marqués, de deux calorimètres identiques, d'un réchaud électrique ou à gaz (ou de tout autre type) et d'un thermomètre.

98. On dispose d'un accumulateur dont on ne connaît ni la force électromotrice ni la résistance intérieure, d'un ampèremètre, de fils de connexion et de deux résistances dont l'une est de valeur connue alors que la valeur de l'autre est inconnue. Comment calculer la valeur de la résistance inconnue?

99. Vous avez à votre disposition une pile Grenet (électrodes: zinc et charbon; électrolyte: acide sulfurique dilué avec addition de bichromate de potassium comme dépolarisateur), une

balance précise munie d'un jeu de poids marqués, un rhéostat, un ampèremètre, une règle, un aide-mémoire de physique et une carte géographique du pays. Comment se servir de ces objets pour calculer la vitesse moyenne de votre camarade qui fait en vélo l'aller-retour jusqu'à un bourg voisin?

100. On a un circuit électrique complexe composé de condensateurs identiques à capacité donnée C, montés en série et en parallèle. La capacité de la batterie a été d'abord calculée théoriquement. Le circuit étant très complexe, il sera logique de vouloir vérifier expérimentalement le résultat théorique. On se propose à cet effet d'utiliser un jeu de résistances identiques, un voltmètre, un ampèremètre et une batterie d'accumulateurs. Comment faut-il procéder dans ce cas?

101. Comment mesurer le volume d'une salle si l'on dispose à cet effet d'une pelote de fil de cuivre, d'une balance munie d'un jeu de poids marqués, d'un accumulateur, d'un voltmètre, d'un ampèremètre et d'un aide-mémoire de physique?

102. Imaginez une méthode pour définir le volume de la salle si de la série d'objets du problème précédent vous ne pouvez disposer que de la pelote de fil et de la balance munie d'un jeu de poids marqués.

103. La fréquence d'un diapason en invar (acier au nickel à dilatation très faible) est de 440 Hz; elle ne dépend pratiquement pas de la température. Comment peut-on déterminer la température dans un laboratoire en comptant les oscillations du diapason et d'un tuyau d'orgue qui à 0 °C produit également 440 oscillations par seconde si la longueur de ce dernier ne change pas avec la température?

À L'USINE

104. Comment s'assurer sans aucun appareil ou autre corps si la lame de scie est aimantée?

105. Imaginez un procédé pour calculer l'aire d'une plaque homogène de forme irrégulière à l'aide d'un triangle gradué, de ciseaux et d'une balance munie d'un jeu de poids marqués.

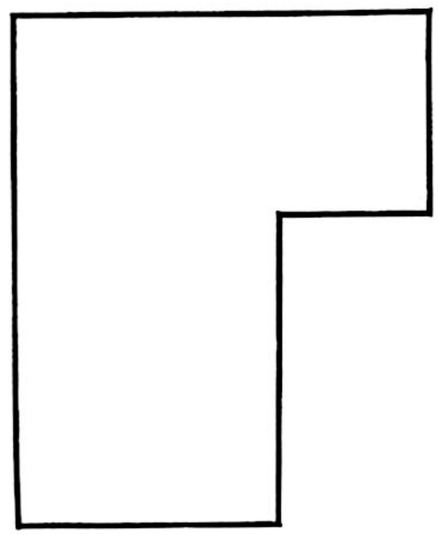
106. Soient un récipient contenant une substance fondue et un morceau de cette même substance à l'état solide. Comment sans attendre la solidification prédire ce qu'il adviendra du volume de la masse fondue lors du passage à l'état solide?

107. Comment à l'aide d'une règle non graduée définir la position du centre de gravité d'une plaque métallique homogène (fig. 3) dont tous les angles sont droits?

108. Que faut-il entreprendre pour déterminer à l'aide d'un aimant (il vaut mieux que ce soit un aimant en fer à cheval) si une lampe électrique est alimentée en courant continu ou en courant alternatif?

109. Aux deux couples de bornes d'un wattmètre (appareil prévu pour mesurer la puissance fournie aux installations électriques par le réseau) sont connectées les deux bobines du wattmètre,

Fig. 3



la bobine d'intensité montée en série avec l'installation et, par conséquent, d'une résistance faible, et la bobine de tension montée en parallèle. Le marquage des bornes s'est effacé. Peut-on dire sans ouvrir l'appareil et en utilisant deux conducteurs et une lampe de poche quelles sont les bornes et les bobines qui leur sont connectées?

110. Comment à l'aide d'un voltmètre déterminer de quel côté se trouve la source de courant dans une ligne à deux conducteurs?

111. Un tourneur inexpérimenté a fabriqué un lot de pièces avec une erreur de poids de 10 grammes pour chaque pièce. Avant d'être dirigées vers la fonderie, ces pièces rebutées sont conservées au magasin dans une caisse isolée avec neuf autres caisses parfaitement identiques contenant des pièces de poids requis.

Le magasinier distrait a oublié quelle était la caisse des pièces défectueuses. Il n'est pas difficile de l'établir, certes, en pesant à tour de rôle des échantillons tirés de chaque caisse. Mais les pièces à refondre pouvaient se trouver dans la dernière caisse et il aurait fallu alors effectuer neuf pesées (si les neuf précédentes montrent que les pièces sont bonnes, la dixième est inutile). Mais le chef du magasin entré à ce moment a dit qu'une pesée suffit.

Comment le magasinier doit-il s'y prendre?

112. Comment examiner la surface d'une pièce serrée dans le mandrin d'un tour sans arrêter ce dernier?

113. Un moteur à collecteur à caractéristique série est mis en circuit à l'aide d'un rhéostat qui permet de régler progressivement sa vitesse de rotation.

Que faut-il faire pour établir la vitesse de rotation du moteur égale à: a) 750 tours par minute; b) 1 500 tours par minute, en utilisant une lampe à néon, un compas, une règle, un crayon, de la colle, des ciseaux et une feuille de carton?

114. La rotation rapide de l'arbre d'une machine n'est perçue que d'après un miroitement fréquent de la surface. Il faut connaître le nombre de tours de l'arbre mais on n'a pas de compte-tours à sa disposition. On ne peut recourir qu'à un bout de craie et à une montre à trotteuse.

Comment faut-il procéder dans ce cas?

DANS L'ESPACE

115. Un astronaute sorti dans l'espace ouvert doit revenir dans son vaisseau. Sur la Terre cela ne présente pas de problème, pour rentrer chez soi on n'a qu'à faire un bout de chemin à pied; or, dans l'espace tout est considérablement plus compliqué: on ne peut poser les pieds sur rien pour se repousser. Que doit faire alors l'astronaute pour se déplacer?

116. La masse des corps se définit soit à l'aide d'une balance à bascule, soit à l'aide d'une balance à ressort. Il semble que dans les conditions de l'apesanteur, par exemple sur un petit satellite artificiel de la Terre ou sur un vaisseau spatial qui se meut les moteurs débranchés, ces balances ne fonctionneraient pas. Que feriez-vous si dans ces conditions il vous fallait malgré tout mesurer la masse d'un corps à l'aide d'une balance?

Quelle balance faut-il utiliser, la balance à bascule ou celle à ressort, et comment?

117. En s'approchant d'une planète inconnue, un vaisseau spatial, après avoir débranché ses moteurs, a emprunté une orbite circulaire et les astronautes ont entrepris des études préalables. Peuvent-ils déterminer la densité moyenne de la matière de la planète en n'utilisant qu'une montre?

118. Pour déterminer expérimentalement l'accélération de la gravité sur une planète qui vient d'être découverte, les astronautes ont décidé d'employer une petite bille d'acier, une lampe puissante, un moteur électrique à vitesse constante connue et qui porte sur son axe un disque de carton à fente radiale étroite, un morceau de drap noir, une règle graduée et un appareil photographique chargé d'un film très sensible.

Comment faut-il arranger cette collection d'objets et d'appareils pour mener à bien cette tâche?

119. Comment résoudre le problème précédent à l'aide d'un poids marqué de masse connue et d'un dynamomètre?

120. Les astronautes avaient à définir la masse de la planète sur laquelle ils ont été déposés par la fusée. A cet effet ils ont utilisé une balance à ressort et un poids d'un kilogramme. Comment s'y sont-ils pris connaissant à l'avance le rayon de la planète fourni par des mesures astronomiques?

121. En poursuivant leur étude de la planète sur laquelle ils ont été déposés, les astronautes se sont mis une deuxième fois (voir problème n° 117) à définir la densité moyenne de sa matière. Dites, comment ils doivent procéder s'ils disposent d'un fil de longueur connue, d'un plomb et d'une montre. Les astronautes connaissent aussi la longueur de l'équateur de la planète, qu'ils ont réussi à déterminer avant la pose en douceur.

122. Un professeur de collège américain suivait chez lui l'émission télévisée de la descente des astronautes sur la Lune. Il a remarqué à côté d'un des astronautes debout près d'un module un objet lourd qui se balançait suspendu à une sorte de câble. En consultant sa montre, il a su déterminer l'accélération de la gravité sur la Lune. Comment a-t-il procédé pour le faire?

123. Comment en arrivant sur une planète inconnue, des astronautes peuvent-ils s'assurer si la planète possède ou non un champ magnétique à l'aide d'un galvanomètre sensible et d'une pelote de fil métallique?

124. Un astronaute sorti dans l'espace ouvert et non lié au vaisseau ni à un objet quelconque doit tourner de 180°. Comment doit-il procéder dans ce cas?

125. Imaginons la vie apparue sur Vénus et, le temps aidant, elle a abouti à la formation des êtres doués de raison (des « humanoïdes » suivant la terminologie des auteurs de science-fiction modernes). Les conditions ambiantes étant très particulières, en développant la science, ces êtres devraient tomber sur des difficultés absolument inconnues aux Terriens. Ainsi, la couche des nuages est si épaisse sur Vénus que les Vénusiens ne verraient jamais les astres. On se demande alors s'ils pourraient deviner que leur planète tourne sur son axe et établir le sens de cette rotation? Essayez de proposer une méthode à vous.

1. Un gobelet gradué porte plusieurs échelles prévues pour des matières sèches : farine, semoule, sucre cristallisé, etc. Ces échelles sont graduées en grammes. Il y a également une échelle prévue pour des liquides et graduées en centimètres cubes.

2. Placez la règle par son milieu, par exemple, sur l'arête d'une lime triangulaire, et rappelez-vous la règle de l'équilibre d'un levier.

3. Pesez la casserole vide, puis la casserole pleine d'eau.

4. Réfléchissez comment tracer un plan de manière qu'il divise un cylindre en deux parties de volume égal.

5. Réfléchissez d'abord pourquoi la vitesse de la chute d'un parachutiste diminue brusquement lorsque le parachute s'ouvre.

6. Un bâton est en équilibre s'il repose sur un support par son centre de gravité.

7. Une sphère qui roule sur un plan parcourt en un tour une distance égale à la longueur de sa circonférence.

8. Il est très simple de donner l'expression du diamètre de la bille en fonction de son volume.

9. Enroulez sur le crayon quelques spires jointives de fil métallique.

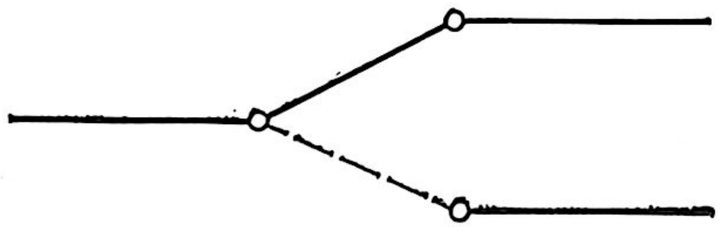
10. Rappelez-vous le principe d'Archimède.

11. Ce problème-là se résout également en appliquant le principe d'Archimède. L'aiguille à tricoter ne sert qu'à immerger le bouchon.

12. Plus la densité d'un corps flottant est grande, plus son volume émergé est petit.

13. Archimède a découvert son principe en méditant sur le moyen d'établir si la couronne fabriquée par un orfèvre pour le roi Hiéron était

Fig. 4



bien en or sans être alliée de l'argent. Dans notre problème, la couronne c'est le bouchon en liège, l'or c'est le verre et l'argent c'est l'air.

14. Un bâton appuyé contre le mur se met à glisser et tombe si son inclinaison par rapport au plancher est suffisamment petite.

15. On dit que la puissance d'une lentille est plus grande si la distance focale est plus petite.

16. La puissance d'un système de deux lentilles minces jointives est égale à la somme des puissances des lentilles isolées.

17. Pour résoudre le problème, le plus simple serait peut-être d'utiliser un interrupteur unipolaire (fig. 4).

18. Si on jette la boîte du toit d'une maison, on entend très bien le bruit que fait le choc de la boîte contre le sol.

19. Plus le diamètre d'un récipient est grand, plus son remplissage est lent.

20. La hauteur d'un jet est définie par la vitesse de l'écoulement de l'eau.

21. Observez les variations du diamètre du filet à mesure que ce dernier s'éloigne du robinet.

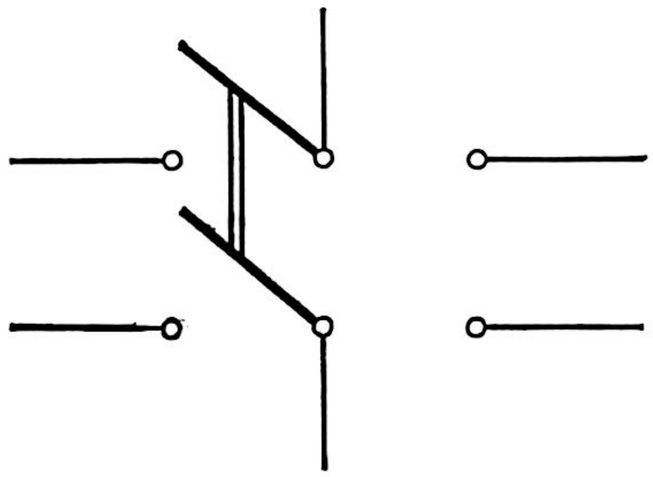
22. Voir la suggestion du problème précédent.

23. La densité d'un gaz est fonction de la pression qu'il subit.

24-26. La température étant invariable, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression.

27. Rappelez-vous les formules de la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer et vaporiser une substance.

Fig. 5



28, 29. La résistance électrique d'un métal qu'on chauffe augmente suivant une loi linéaire.

30. La quantité de l'énergie fournie par réseau électrique est proportionnelle à la puissance de l'appareil branché, ainsi qu'à la durée de son fonctionnement.

31. Un écran de télévision devient luminescent sous l'effet d'un faisceau électronique qui frappe cet écran.

32. Essayez d'utiliser des commutateurs bipolaires (voir fig. 5).

33. Réfléchissez sur la force qui déplace le dé suivant une circonférence, c'est-à-dire qui joue le rôle d'une force centripète.

34, 35. Rappelez-vous la formule de la période d'oscillation d'un pendule mathématique.

36. Il est facile de calculer le temps que met un corps pour tomber d'une hauteur pas trop grande.

37. Essayez de mettre le barreau en mouvement en appliquant une force à différentes hauteurs et observez son comportement.

38. La masse étant la même, il est plus difficile de faire tourner un volant dont la masse forme une jante qu'un volant plein.

39. Le mouvement rotatif est régi par une loi analogue à la loi de la conservation de la quantité du mouvement, propre à la translation.

40. La résistance du fil à la rupture dépend de son diamètre et du matériau utilisé.

41. Le centre d'une bille qui roule à la surface d'un miroir effectue un mouvement pendulaire.

42. Si les bras d'un levier sont de longueurs différentes, un enfant peut équilibrer un adulte.

43. Plus la source du son est éloignée, plus le son met de temps à parcourir la distance.

44. En une seconde la lumière couvre 300 000 km, alors que le son parcourt un peu plus de 300 m.

45. Profitez du fait que dans les triangles semblables les côtés homologues sont proportionnels.

46. Quelle que soit la vitesse d'un signal lumineux à l'autre, les voitures doivent couvrir la même distance.

47. Appliquez le deuxième principe de la dynamique et le principe de l'action et de la réaction.

48. Voir la suggestion du problème nº 45.

49-51. Plus la vitesse d'un corps lancé sous un certain angle par rapport à l'horizon est grande, plus haut il montera et plus il ira loin.

52. Voir la suggestion du problème nº 45.

53. Autour d'une bobine parcourue par le courant électrique il se forme un champ magnétique analogue à celui d'un aimant permanent.

54. La soucoupe avec du mercure est utilisée comme un miroir horizontal dans lequel se reflète la tour.

55. Le point d'ébullition dépend de la pression qui décroît avec la hauteur.

56. Utilisez la relation entre l'éclairement et la distance à la source lumineuse.

57. Souvenez-vous du principe de l'inertie et retenez qu'une plate-forme en rotation n'est pas un système galiléen (système d'axes absolus).

58. Faites attention à la variation de la hauteur du signal.

59. Observez le comportement de la mousse de savon à la surface de l'eau pure.

60, 61. Appliquez les principes fondamentaux de la dynamique.

62. Avant les dernières nouvelles on transmet toujours les signaux horaires.

63. Essayez d'appliquer la loi de Boyle-Mariotte.

64, 65. Quelle que soit la force avec laquelle vous tendrez le fil qui porte le poids suspendu, vous ne parviendrez pas à le rendre rigoureusement horizontal.

66. Réfléchissez à la formule de la force centripète.

67. Les ondes produites par la chute d'une pierre dans l'eau se propagent du point où cette pierre a plongé jusqu'à la rive.

68, 69. La vitesse d'une goutte par rapport à un train ou à une voiture est égale à la somme vectorielle de sa vitesse par rapport au sol et de la vitesse de la voiture par rapport au sol. Examinez l'orientation réciproque de ces trois vecteurs.

70, 72. Considérez les forces appliquées au poids suspendu à un fil.

73. En s'échauffant tous les corps se dilatent.

74. Etudiez la construction et la destination du compteur de vitesse d'une automobile.

75. Comparez les forces nécessaires pour que la barre se déplace vers le haut et vers le bas sur le plan incliné.

76. Rappelez-vous l'expérience d'Œrsted et la règle du tire-bouchon.

77. Immergez les extrémités des conducteurs fixés aux électrodes dans l'eau et observez les phénomènes qui s'y déroulent.

78. Connectez les fils aux électrodes et enfoncez leurs extrémités libres dans la pomme de terre coupée.

79. Le temps de descente d'un cerceau roulant sur une route dépend de la pente de cette dernière.

80. Observez les oscillations des deux pendules.

81. Rappelez-vous le phénomène de capillarité et les lois qui le décrivent.

82. Si l'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, les grains de cette limaille se fixent surtout aux pôles.

83. La densité de l'aluminium pur est donnée dans un aide-mémoire de physique.

84. La vitesse périphérique des points à la surface terrestre dépend de la distance qui les sépare de l'axe de la Terre.

85. La puissance d'une lentille dépend de l'indice de réfraction du matériau dont elle est faite.

86. Des forces égales appliquées aux corps de même masse leur communiquent des accélérations égales.

87. Rappelez-vous la construction et le principe de fonctionnement d'un transformateur.

88. La résistance et la masse d'un conducteur dépendent de son diamètre et de sa longueur.

89. La masse d'un cylindre est directement proportionnelle à sa hauteur et au carré de son diamètre.

90. Lorsque la balle se déplace entre les disques montés sur l'arbre du moteur, ces derniers continuent à tourner.

91. Appliquez la loi de Hooke.

92. Tant que la pente n'est pas très grande, la barre ne glisse pas sur le plan incliné.

93. Voir la suggestion du problème n° 75.

94. Passez le cordon par la poulie et attachez à ses extrémités la charge et le poids.

95, 96. La quantité de chaleur nécessaire pour changer la température d'un corps est proportionnelle à sa masse.

97. Si l'on chauffe de l'eau à 0 °C, la température de cette dernière commence immédiatement à monter, alors que la température de la glace à 0 °C ne change pas avant que toute la glace ne soit fondue.

98. Appliquez la loi d'Ohm pour un circuit fermé.

99. Le passage du courant dans une pile électrique s'accompagne de la dissolution de la substance de l'électrode négative.

100. Dans des circuits de courant alternatif, un condensateur se comporte comme une résistance dont la grandeur est définie par la capacité du condensateur et la fréquence du courant alternatif.

101. La résistance d'un conducteur est directement proportionnelle à sa longueur.

102. Voir la suggestion du problème n° 40.

103. Il faut tenir compte de ce que la vitesse du son est de même ordre que celle des molécules d'un gaz.

104. Cassez la lame en deux.

105. La masse d'une plaque d'égale épaisseur est proportionnelle à son aire.

106. Un corps flotte dans un liquide si sa densité est plus faible que celle du liquide.

107. Le centre de gravité d'un système de deux corps repose sur la droite qui relie les centres de gravité de ces corps.

108. Dans un champ magnétique, un conducteur parcouru par un courant subit une force dont la direction est définie par la direction du courant.

109. Les résistances des deux bobines d'un wattmètre sont sensiblement différentes.

110. La différence de potentiel aux extrémités d'un secteur est proportionnelle au courant qui parcourt ce secteur.

111. Si des trois pièces prises au hasard dans les caisses deux pièces sont rebutées, le poids total des trois pièces sera de vingt grammes inférieur au poids requis. Mais si parmi les trois pièces une seulement est une pièce rebutée, le poids total sera inférieur au poids requis seulement de dix grammes.

112. Notez qu'à chaque tour la pièce se retrouve dans la même position.

113. Une lampe à néon mise en circuit sur un réseau de courant alternatif s'allume cent fois par seconde.

114. Tracez à la craie un trait sur l'arbre en rotation le long de son axe.

115. Rappelez-vous le principe du fonctionnement d'une fusée.

116. Comme l'a signalé pour la première fois A. Einstein, les forces d'inertie qui apparaissent dans des systèmes animés d'un mouvement accéléré sont équivalentes aux forces de gravitation.

117. Donnez l'expression de la force centripète par la période de rotation et comparez l'expression obtenue à la force de gravitation.

118. Les trajets parcourus par un corps en chute durant des intervalles de temps égaux ont le même rapport que les nombres impairs consécutifs.

119. Appliquez le deuxième principe de la dynamique.

120. Rappelez-vous la loi de l'attraction universelle.

121. Revoyez les suggestions des deux problèmes précédents.

122. Utilisez la formule de la période d'oscillation d'un pendule mathématique.

123. Les variations du flux magnétique qui passe par une bobine engendrent dans cette dernière une force électromotrice d'induction.

124. Quand le rotor d'un moteur électrique est bloqué, c'est le stator qui se met en rotation si rien ne l'empêche de tourner.

125. Rappelez-vous les propriétés d'un gyroscope et d'un pendule.

1. En versant une certaine quantité de sucre cristallisé dans le gobelet gradué décrit dans la section « Suggestions », lisons la masse de ce sucre sur l'échelle correspondante et son volume sur l'échelle des liquides. Puis, calculons selon le procédé usuel la densité. Toutefois, la valeur obtenue sera légèrement inférieure à la valeur réelle, car le volume ainsi obtenu comprend également l'air des interstices entre les grains de sucre.

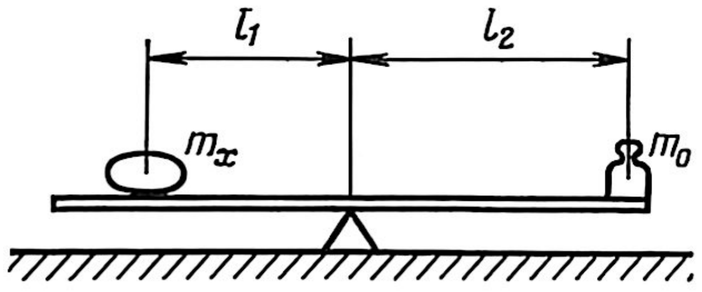
2. La solution est illustrée par la figure 6. La règle doit être posée sur l'arête de la lime par son milieu, ce qui est rendu facile par la graduation. Ensuite, on cherche une position d'équilibre du poids et du corps considéré. La condition d'équilibre d'un levier

$$m_x g l_1 = m_0 g l_2$$

(g est l'accélération de la gravité) donne alors la masse recherchée m_x. Les grandeurs l_1 et l_2 sont lues sur la règle, alors que par hypothèse m_0 est égale à 100 g. Dans l'égalité qui traduit la condition d'équilibre du levier, on peut négliger le poids de la règle, le moment de cette force par rapport à l'axe de rotation étant nul.

Pour répondre à la deuxième question, il faut retenir que dans tous les pays le poids des monnaies métalliques bien défini est garanti par la force souveraine; en U.R.S.S., par exemple, le

Fig. 6



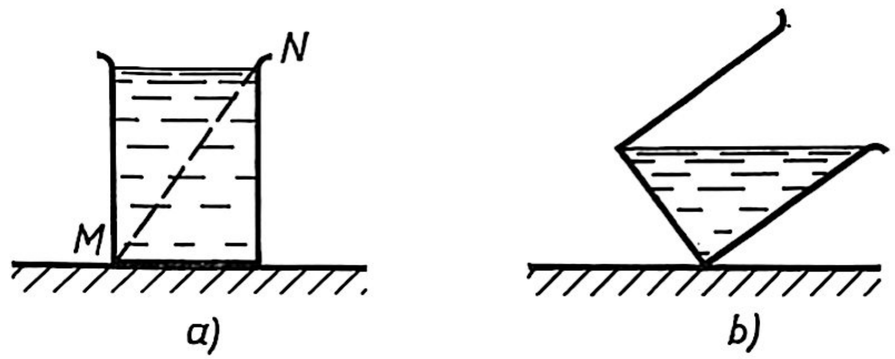


Fig. 7

poids en grammes des monnaies jusqu'à cinq kopecks coïncide avec leur valeur.

3. Soient m_1 et m_2 les masses d'une casserole vide et d'une casserole pleine d'eau respectivement. La différence $m_2 - m_1$ donne alors la masse de l'eau dans le volume de la casserole. En divisant cette différence par la densité de l'eau ρ, on obtient le volume recherché:

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho}.$$

4. Si par les points M et N on mène en pensée un plan suivant la figure 7, a, ce plan coupe le cylindre en deux figures symétriques et donc égales en volume d'où la solution du problème.

En inclinant progressivement le verre, on verse le liquide jusqu'à ce que le fond apparaisse à peine (fig. 7, b). A ce moment le verre contient exactement la moitié du liquide.

5. La boîte qui tombe est sollicitée par deux forces: attraction terrestre et résistance de l'air. La première est définie par la masse et est plus grande pour la boîte la plus pleine. Quant à la seconde, elle est la même pour les deux boîtes si les vitesses sont égales. C'est pourquoi, en général, la résultante de ces forces est plus grande pour la boîte la plus pleine. Par conséquent, l'accélé-

ration *) de cette dernière étant plus grande, elle prend plus de vitesse et atteint la première le sol. Ainsi, il faut que les garçons laissent tomber simultanément du balcon les deux boîtes. Celle qui contient plus d'allumettes touchera le sol la première. Bien sûr, pour que les résultats soient convaincants, il faut que le nombre d'allumettes diffère sensiblement d'une boîte à l'autre.

6. Le plus simple, certes, est de trouver le centre de gravité du bâton en l'équilibrant sur l'arête de la main. On sait que l'équilibre traduit le fait que le centre de gravité se trouve au-dessus du point d'appui. Toutefois, il existe un moyen plus intéressant et plus suggestif de résoudre le problème.

Si l'on pose le bâton horizontalement sur les deux mains bien verticales et l'on rapproche lentement les mains, celles-ci se toucheront toujours au centre de gravité et le bâton ne tombera pas quelle que soit la vitesse de ce rapprochement.

Il en est ainsi du fait que lorsqu'une main se rapproche du centre de gravité, la pression qu'elle subit augmente par rapport à la pression exercée sur la deuxième main plus éloignée de ce centre. La pression augmentant simultanément avec la force de frottement, cette dernière devient plus grande que la force de frottement s'exerçant entre le bâton et la deuxième main ; il en résulte que le bâton cesse de se déplacer par rapport à la première main et commence à se déplacer sur la deuxième main. Le centre de gravité se trouve donc toujours entre les paumes pour être finalement « rattrapé » quand elles se touchent.

---

*) L'accélération croît avec l'augmentation de la masse du fait que

$$a=\frac{P-F_{\text{rés}}}{m}=\frac{mg-F_{\text{rés}}}{m}=g-\frac{F_{\text{rés}}}{m}.$$

7. Il suffit de mouiller le ballon avec de l'eau et de le faire rouler sur le plancher pour qu'il fasse un tour, puis de mesurer la longueur de la trace qu'il laisse. Le diamètre d se calcule ensuite d'après la formule

$$d = l:\pi.$$

On peut également prendre un fil et l'enrouler une fois sur le ballon suivant son « équateur », mesurer la longueur du fil et calculer le diamètre d'après la même méthode.

8. On établit d'abord de la manière ordinaire le volume de la bille à l'aide du gobelet gradué, puis, d'après la formule

$$d=\sqrt[3]{6V/\pi}$$

on calcule le diamètre d.

9. Le côté d'un carreau d'un cahier d'écolier est égal avec une précision suffisant à cinq millimètres (l'auteur a vérifié plusieurs cahiers et dans le pire des cas 40 carrés ont fait non pas 200 mais 202 mm, ce qui correspond à une précision de 1 %). On peut utiliser ce fait pour résoudre le problème.

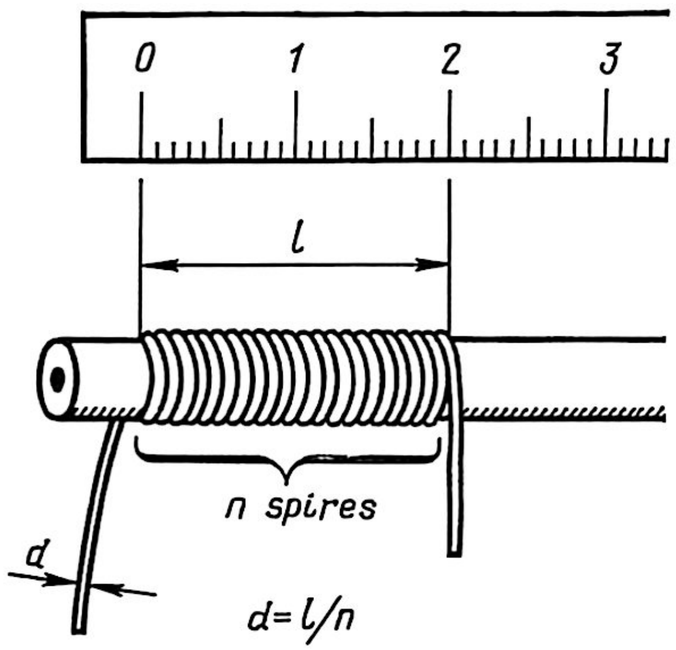
Il faut enrouler le fil sur le crayon en rendant les spires jointives, leur quantité devant suffire pour couvrir un nombre entier de carreaux. Le nombre de spires ne doit pas être trop petit, autrement l'erreur, comme on le verra par la suite, sera trop grande. Ensuite, en divisant la longueur l couverte sur le crayon par le fil par le nombre n de spires, on obtient la grandeur cherchée :

$$d = l/n$$

(voir fig. 8 sur laquelle la feuille de cahier est remplacée par une règle).

Dans la théorie des erreurs il est démontré que l'erreur relative d'une fraction est égale à la somme des erreurs relatives du numérateur et du

Fig. 8



dénominateur. Dans notre cas l est définie à 1 % près (voir ci-dessus). En dénombrant les spires, un expérimentateur peut se tromper d'une: il est souvent difficile de dire lequel des nombres, par exemple 49 ou 50, est plus correct. C'est pourquoi pour le dénominateur on obtient une erreur relative d'environ 0,02. Ainsi, en déterminant le diamètre du fil, l'erreur relative est de 3 %; or, pour un diamètre de 0,1 mm, l'erreur absolue est alors égale à 0,003 mm, ce qui n'est pas si mal. Malheureusement, l'erreur réelle sera toujours plus grande, car il est dificile de rendre les spires bien jointives.

10. Si un corps flotte dans l'eau, sa masse est égale à la masse de l'eau déplacée. Cherchons d'abord le volume de l'eau déplacée en multipliant l'aire de la section du récipient, obtenue à partir des mesures prises à la règle, par la diminution du niveau d'eau dans le récipient une fois que le corps en a été retiré (mesurée également avec la règle). En multipliant le volume de l'eau déplacée par sa densité, on trouve la masse de l'eau et, par conséquent, la masse du corps qui flotte.

11. En plaçant le bouchon dans le gobelet gradué et en notant la montée du niveau de l'eau calculons la masse du bouchon par la méthode du problème précédent. On détermine le volume du bouchon en immergeant ce dernier par l'aiguille à tricoter. Maintenant la densité se calcule sans difficulté.

12. Outre la méthode du problème précédent, on peut encore proposer le procédé suivant. Mesurons la longueur totale du bâton, puis plaçons-le dans l'eau. Supposons que sa longueur totale est l_1 et celle de sa partie immergée l_2. La masse du bâton s'écrit alors

$$m_1 = l_1 S \rho_1,$$

où ρ_1 est la densité du bois et S la section transversale du bâton.

Mais la masse de l'eau déplacée est:

$$m_2 = l_2 S \rho_2,$$

où ρ_2 est la densité de l'eau. Puisque le bâton flotte dans l'eau, ces masses sont égales:

$$l_1 S \rho_1 = l_2 S \rho_2,$$

d'où

$$\rho_1 = \rho_2 (l_2/l_1).$$

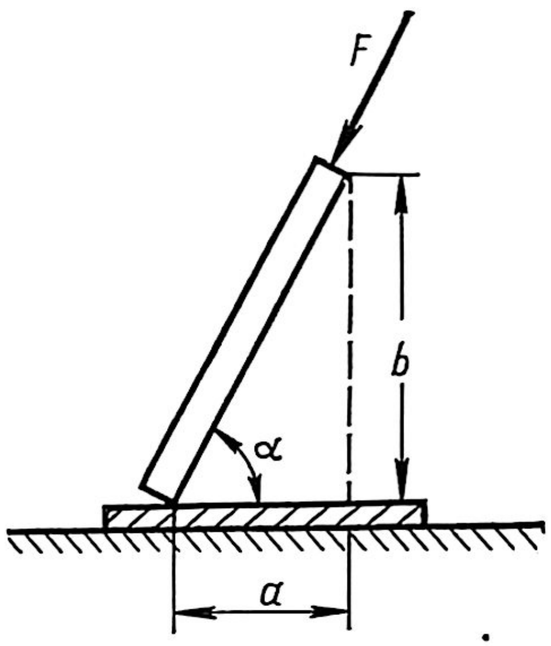
Il importe que le bâton soit maintenu en position verticale ou, au moins, que son inclinaison soit faible, car s'il était étendu horizontalement, il serait bien plus difficile de résoudre le problème. C'est pourquoi le vase cylindrique employé doit être étroit pour que ses parois empêchent le bâton de s'étendre dans le sens horizontal.

13. Le volume de la cavité V_{cav} est lié à celui du bouchon V_b et du verre V_v par une relation évidente:

$$V_{cav} = V_b - V_v.$$

Soit m_1 la masse du bouchon. Si pour peser le bouchon on l'immerge (pesage dit hydrostatique),

Fig. 9



les lectures de la balance tombent à m_2 suivant le principe d'Archimède qui établit l'existence d'un poussée verticale subie par le bouchon. On détermine sans peine que la diminution apparente de masse $m_1 - m_2$ est égale à la masse de l'eau déplacée. C'est pourquoi en divisant cette différence par la densité de l'eau ρ_1 on trouve le volume de l'eau déplacée et, par suite, le volume du bouchon;

$$V_b = (m_1 - m_2)/\rho_1.$$

Pour déterminer le volume du verre, il suffit de diviser la masse du bouchon par la densité du verre ρ_2 fournie par des tableaux:

$$V_v = m_1/\rho_2.$$

On a finalement

$$V_{cav} = \frac{m_1 - m_2}{\rho_1} - \frac{m_1}{\rho_2}.$$

14. Placez le bâton verticalement sur la tôle de fer, puis inclinez-le progressivement en appuyant sur son bout supérieur (voir fig. 9). Lorsque l'angle d'inclinaison α atteint une certaine valeur, le bâton commence à glisser sur la tôle. Ceci se

produit à l'instant où la composante horizontale de la force F appliquée au bout supérieur du bâton dans le sens de sa longueur devient égale à la force de frottement.

La composante horizontale de F s'écrit $F \cos \alpha$. La force de frottement peut s'exprimer aussi de la façon suivante:

$$E_{fr} = k (P + F \sin \alpha),$$

où k est le coefficient de frottement recherché, P le poids du bâton et $F \sin \alpha$ la composante verticale de F qui serre le bâton (avec son poids) contre la tôle. En égalant ces forces, on obtient:

$$k (P + F \sin \alpha) = F \cos \alpha,$$

d'où

$$k = \frac{F \cos \alpha}{P + F \sin \alpha}.$$

Comme par hypothèse le poids du bâton est faible on peut négliger le premier terme du dénominateur, d'autant plus que la force F avec laquelle l'expérimentateur pousse le bâton par son bout supérieur n'est limitée que par les possibilités de l'expérimentateur et la résistance du bâton. On a donc

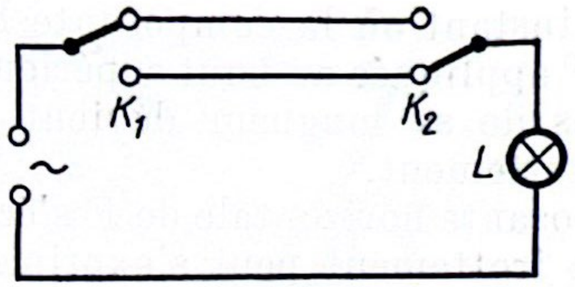
$$k = \frac{F \cos \alpha}{F \sin \alpha} = \operatorname{cotg} \alpha = \frac{a}{b}.$$

Ainsi, pour définir le coefficient de frottement il suffit de mesurer a et b, ce qui est facile à faire à l'aide d'une règle.

15. On éloigne les lentilles du mur pour obtenir sur ce dernier une image bien nette du fil de la lampe. La lentille qui donnera cette image tout en étant la plus proche du mur est la plus puissante.

16. Il faut appliquer l'une des lentilles à l'autre. Si le système obtenu fait converger les rayons, la puissance de la lentille convergente est

Fig. 10



plus grande. Dans le cas contraire, c'est la lentille divergente qui est la plus puissante.

17. Il faut utiliser deux commutateurs monopolaires et les intercaler dans le circuit d'alimentation de la lampe comme le montre la figure 10.

18. Il faut laisser tomber la boîte du toit d'une maison, en appuyant en même temps sur le bouton du chronomètre. Il faut arrêter ce dernier dès qu'on entend le bruit du choc de la boîte contre le sol. Le temps t indiqué par le chronomètre se compose du temps t_1 de la chute de la boîte et du temps t_2 que mettra le bruit du choc contre le sol pour atteindre l'observateur.

t_1 est lié à la hauteur h de la maison de la façon suivante:

$$h = gt_1^2/2,$$

alors que la relation entre h et t_2 s'écrit

$$h = ct_2,$$

où c est la vitesse du son; pour le calcul, nous admettrons qu'elle est égale à 340 m/s.

En utilisant ces expressions pour calculer t_1 et t_2 et en portant leurs valeurs dans la formule liant t, t_1 et t_2, on obtient l'équation irrationnelle

$$\sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{h}{c} = t$$

qui permet de trouver la hauteur de la maison.

Dans des calculs approchés (surtout si la maison n'est pas haute), le deuxième terme du premier membre peut être considéré comme très petit

et on peut donc le négliger. Alors

$$\sqrt{2h/g} \approx t \quad \text{et} \quad h \approx gt^2/2.$$

19. Mesurons avec le pied à coulisse la hauteur h et le diamètre d_1 du récipient et calculons son volume:

$$V = \frac{\pi d_1^2}{4} h.$$

Ensuite, déterminons à l'aide du chronomètre le temps t nécessaire pour que la boîte se remplisse de l'eau qui s'écoule. La quantité d'eau qui s'écoule par unité de temps est

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \frac{h}{t}.$$

D'autre part, nous pouvons exprimer Q comme le produit de la vitesse recherchée v de l'écoulement de l'eau par l'aire S de la section transversale du robinet:

$$Q = Sv = \frac{\pi d_2^2}{4} v,$$

où d_2 est le diamètre du robinet.

En égalant les seconds membres, on obtient:

$$v = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \frac{h}{t}.$$

Comme d_2 peut être également mesuré au pied à coulisse, le problème se trouve en principe résolu.

20. En dirigeant le flexible verticalement vers le haut, déterminons à l'aide d'une règle la hauteur h atteinte par le jet d'eau. La vitesse de l'écoulement v est alors fournie par la formule

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Le produit de la vitesse ainsi obtenue par l'aire S de la section tranversale de l'embout (son diamètre d est également mesuré à la règle) donne

le débit de l'eau Q, c'est-à-dire la quantité qui s'écoule par seconde :

$$Q = vS = \sqrt{2gh}\,\frac{\pi d^2}{4}.$$

Maintenant il est possible de calculer le temps de remplissage du bac, puisque sa capacité V est connue à l'avance :

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{4V}{\pi d^2 \sqrt{2gh}} \approx \frac{0{,}9V}{d^2 \sqrt{gh}}.$$

21. Puisque l'eau se déplace avec l'accélération d'un corps en chute libre, la vitesse v_1 de son écoulement et sa vitesse v_2 à la distance h du robinet sont liées par une relation simple :

$$v_2^2 - v_1^2 = 2gh.$$

D'autre part, par la section du robinet et par la section du filet à la distance h du robinet passent par unité de temps les mêmes quantités d'eau :

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot v_2,$$

où d_1 et d_2 sont respectivement les diamètres du filet près du robinet et à la distance h *).

En calculant v_2 dans la dernière égalité et en la portant dans l'expression précédente, on obtient

$$v_1^2 \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right) = 2gh,$$

d'où

$$v_1 = d_2^2 \sqrt{\frac{2gh}{d_1^4 - d_2^4}}.$$

*) On en déduit que le diamètre du filet diminue à mesure qu'on s'éloigne du robinet. Lorsque les filets d'eau tombent d'une grande hauteur, ils se rétrécissent tellement qu'ils se transforment en gouttes isolées ; l'eau de grandes chutes, par exemple, forme en bas une « poussière » d'eau.

Ensuite on cherche la quantité d'eau qui s'écoule du robinet par unité de temps (débit de l'eau)

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 = \frac{\pi d_1^2 d_2^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{d_1^4 - d_2^4}}.$$

Ainsi, le problème se ramène à la mesure de d_1, d_2 et h, ce qui peut se faire en effet à l'aide d'une règle.

Rappelons une fois de plus qu'en s'écoulant du robinet le filet doit être *faible*, car un filet fort se comprime non seulement sous l'effet de la poussée, mais encore pour d'autres raisons. Sa compression peut être due, par exemple, au fait que le liquide arrive jusqu'au trou à partir d'un tube plus large que le robinet et ses particules guidées par les parois continuent à se rapprocher de l'axe du filet une fois le trou passé. Un écoulement rapide du liquide peut également modifier la *forme* de la section transversale du filet à mesure que ce dernier s'éloigne du trou (ce phénomène s'appelle *inversion* du filet). Les changements sont apparents surtout dans le cas des orifices carrés et triangulaires (sections du robinet). Ainsi, la section transversale du filet qui s'échappe d'un trou carré prend d'abord la forme d'un octangle, puis devient cruciforme. Si le trou est triangulaire, la section du filet prend la forme de trois bras minces issus du même centre. Naturellement, ceci peut influer sensiblement sur le débit. Il est curieux de noter que même dans le cas d'une section ronde, le débit de l'eau augmente de 1,3 à 1,4 fois si au lieu d'un embout cylindrique le flexible d'arrosage est muni, par exemple, d'un embout conique avec un angle au sommet de 13° environ (les sections de sortie étant les mêmes).

22. Utilisons la formule obtenue pour le problème précédent:

$$Q = \frac{\pi d_1^2 d_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2gh}{d_1^4 - d_2^4}}.$$

(Q la quantité de l'eau qui s'écoule du robinet par unité de temps, d_1 le diamètre du filet près du robient, d_2 le diamètre du filet à une distance h du robinet.)

En tenant compte de ce que $Q = V:t$ (V est le volume de l'eau qui s'écoule du robinet en un temps t), on obtient finalement

$$g = 8 \cdot \frac{V^2}{t^2} \cdot \frac{d_1^4 - d_2^4}{\pi d_1^4 \cdot d_2^4 h}.$$

Les grandeurs d_1, d_2 et h se mesurent avec une règle, t avec une montre et v est connu par hypothèse.

La méthode proposée ne prétend pas être précise. Sans nous attarder aux erreurs possibles, indiquons seulement deux d'entre elles.

Premièrement, les résultats des mesures sont faussées sensiblement par la viscosité de l'eau. Dans le cas des liquides encore plus visqueux, on peut obtenir pour g une valeur qui n'a rien à voir avec la valeur réelle.

Deuxièmement, même une erreur relativement faible dans la détermination de d_1 et d_2 influe fortement sur l'erreur du résultat final puisque dans la formule de calcul ces grandeurs sont élevées à la puissance *quatre* (on peut montrer que dans la détermination d'une puissance une erreur relative est égale au produit de l'erreur relative de la base par l'exposant).

23. Tous les corps subissent dans l'air l'effet d'une poussée égale au poids de l'air déplacé. On peut donc écrire le résultat d'un pesage du ballon dont la pression est p sous la forme suivante:

$$M = M_b + M_a - m,$$

où M_b est la masse de la vessie et du cuir, M_a la masse de l'air contenu dans le ballon et m la masse de l'air déplacé par le ballon. On voit sans peine que si on néglige le volume de la vessie et du cuir (et, par suite, la poussée qui s'exerce sur eux suivant le principe d'Archimède), pour un ballon contenant de l'air à la pression atmosphérique les deux derniers termes sont égaux et la pesée donne la masse M_b de la vessie et du cuir.

Puisque le pompage ne change pratiquement pas le volume V du ballon, le dernier terme du second membre est constant, de même d'ailleurs que le premier. Ainsi, la différence $M - M_0$, où M et M_0 sont les masses du ballon (déterminées à l'aide d'une balance) qu'on a gonflé respectivement jusqu'à une pression «de travail» p et une pression atmosphérique p_0, divisée par le volume du ballon, donne l'augmentation de la densité de l'air de ρ_0 qui correspond à la pression atmosphérique à ρ sous la pression recherchée:

$$\frac{M - M_0}{V} = \rho - \rho_0.$$

Le volume du ballon ne changeant pas sous l'effet du pompage, la densité du gaz croît de façon directement proportionnelle à la pression:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0}.$$

Des deux dernières expressions on tire la formule qui donne la grandeur nécessaire:

$$p = \frac{p_0}{\rho_0}\rho = \frac{p_0}{\rho_0}\left(\rho_0 + \frac{M - M_0}{V}\right) =$$

$$= p_0 + \frac{p}{\rho_0} \cdot \frac{M - M_0}{V}.$$

Dans cette expression la différence des masses s'obtient à l'aide de la balance, le volume du ballon se calcule d'après le diamètre mesuré à la

règle (voir problème n° 7), alors que les grandeurs p_0 et ρ_0 sont fournies par des tableaux (elles valent respectivement 1 atmosphère et 1,293 kg/m³). Si l'on veut obtenir un résultat plus exact, il faut tenir compte du fait que la densité de l'air change avec la température, c'est-à-dire qu'au lieu de la valeur 1,293 qui correspond à 0 °C, il faut porter dans la formule ci-dessus la densité qui correspond à la température de l'air au moment considéré.

24. Enlevons d'abord le culot avec les précautions qui s'imposent pour ne pas casser l'ampoule et immergeant l'ampoule tout entière dans l'eau mesurons à la règle la montée Δh_1 du niveau dans le récipient. Ensuite, sans sortir l'ampoule de l'eau, cassons la pointe du queusot (tube par lequel on pompe l'air de l'ampoule pour la remplir de gaz inerte). Une certaine quantité d'eau pénétrera dans l'ampoule et son niveau dans le récipient baissera devenant seulement de Δh_2 plus élevé que tout au début. Ces renseignements sont tout à fait suffisants pour résoudre le problème.

En effet, à la pression recherchée p le gaz occupait tout le volume de l'ampoule V_1; ce volume peut s'écrire, en négligeant l'épaisseur des parois, comme le produit de la section transversale du récipient S par la montée du niveau de l'eau dans le récipient due à l'immersion de l'ampoule: $V_1 = S\Delta h_1$.

Une fois que la pointe du queusot a été cassée, la pression du gaz dans l'ampoule est devenue égale à la pression atmosphérique (la pression de la colonne d'eau au-dessus de l'ampoule est négligeable par rapport à la pression atmosphérique) alors que son volume a diminué jusqu'à $V_2 = S\Delta h_2$.

Si l'on considère que la température du gaz est invariable, écrivons d'après la loi de Boyle-Mariotte

$$pS\Delta h_1 = p_0 S\Delta h_2, \quad \text{d'où} \quad p = p_0 \frac{\Delta h_2}{\Delta h_1}.$$

Les variations du niveau d'eau Δh_1 et Δh_2 se mesurent à la règle, alors que p_0 est soit indiquée par un baromètre, soit posée égale à une atmosphère (760 mm de la colonne de mercure).

25. De même que dans la première variante de la solution du problème, dégageons le culot avec toutes les précautions possibles, puis pesons l'ampoule. Supposons que sa masse soit m_1. Immergeons-la dans l'eau et cassons le queusot. Lorsque l'eau cessera de pénétrer dans l'ampoule et lorsque seul l'espace p_0 occupé par le gaz comprimé jusqu'à une pression atmosphérique n'est pas rempli d'eau, retirons l'ampoule de l'eau et déterminons de nouveau sa masse. Supposons que la masse de l'ampoule remplie en partie d'eau soit m_2. Emplissons maintenant l'ampoule et cherchons encore sa masse. Supposons qu'elle soit égale à m_3.

On s'assure sans peine que la différence $m_3 - m_1$ donne la masse d'eau qui remplit complètement l'ampoule de la lampe. En divisant cette différence par la densité ρ de l'eau on trouve le volume intérieur de la lampe, autrement dit le volume du gaz à la pression p recherchée.

Par ailleurs, la différence $m_3 - m_2$ divisée par la densité de l'eau donne le volume de ce même gaz à la pression atmosphérique p_0.

En admettant que pendant la compression la température du gaz ne change pas, on peut écrire d'après la loi de Boyle-Mariotte

$$p\,\frac{m_3 - m_1}{\rho} = p_0\,\frac{m_3 - m_2}{\rho}.$$

D'où la pression recherchée

$$p = p_0\,\frac{m_3 - m_2}{m_3 - m_1}.$$

26. Si le tube bien vertical est placé le trou en haut, l'air qu'il contient subit une pression

$$p_1 = p_0 + \rho g h,$$

où p_0 est la pression atmosphérique, ρ la densité du mercure, g l'accélération de la gravité et h la hauteur de la colonne de mercure. Cette pression comprime l'air dans le tube jusqu'au volume

$$V_1 = l_1 S$$

(l_1 est la longueur de la colonne d'air, S la section transversale du tube).

Dans le tube vertical placé le trou en bas, la pression est

$$p_2 = p_0 - \rho\, gh,$$

et le volume de l'air

$$V_2 = l_2 S.$$

En considérant que dans les deux cas la température est la même, on a d'après la loi de Boyle-Mariotte

$$(p_0 + \rho\, gh)\ l_1 S = (p_0 - \rho\, gh)\ l_2 S,$$

d'où

$$p_0 = \rho g h \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}.$$

La densité du mercure et l'accélération de la gravité sont données par des tableaux, alors que les grandeurs l_1, l_2 et h se mesurent à la règle.

La formule devient plus simple si la pression de l'atmosphère est exprimée en millimètres de la colonne de mercure:

$$p_0 = h \frac{l_2 + l_1}{l_2 - l_1}.$$

27. Supposons que la casserole contienne de l'eau refroidie jusqu'à 0 °C dans un frigidaire (de petits morceaux de glace flottant dans l'eau). Plaçons-la sur une cuisinière à gaz tout en consultant une montre. Supposons que l'eau commence à bouillir dans un temps τ_1 et s'évapore complètement dans un temps τ_2.

Si le gaz en brûlant produit chaque seconde q joules, les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 nécessaires pour échauffer l'eau et transformer l'eau chaude en vapeur s'écrivent respectivement sous la forme suivante:

$$Q_1 = mc\,(t_{100°} - t_{0°}) = 100mc = q\tau_1,$$

$$Q_2 = mr = q\tau_2,$$

où m est la masse de l'eau versée dans la casserole, c la capacité thermique de l'eau et r la chaleur de vaporisation. En divisant terme à terme les égalités, on obtient:

$$\frac{100c}{r} = \frac{\tau_1}{\tau_2},$$

d'où

$$r = 100c \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

Puisqu'il est impossible de tenir compte exactement des pertes thermiques (par rayonnement dans l'espace ambiant, par échauffement de la casserole, etc.), le résultat obtenu ne doit pas prétendre à être très précis.

28. Montons en série la batterie, la pelote de fil et l'ampèremètre, alors que le voltmètre sera intercalé de façon à donner la tension de la pelote. Notons les indications des appareils et calculons la résistance de la pelote à la température ordinaire:

$$R_t = U/I.$$

Ensuite plaçons la pelote de fil dans de la neige apportée du dehors; attardons-nous un peu pour que la neige commence à fondre et que le fil lui emprunte sa température et déterminons par la même méthode la résistance du fil R_0 à la tem-

pérature de la neige fondante, c'est-à-dire à 0 °C. En appliquant ensuite la relation entre la résistance d'un conducteur et sa température

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

calculons la température de l'air dans la chambre :

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_0 \alpha}.$$

Pour le calcul on utilise la valeur du coefficient thermique de la résistance α fournie par un aide-mémoire. A la température ordinaire, pour le cuivre pur $\alpha = 0{,}0043$ degré$^{-1}$. Si la teneur en additions du cuivre du conducteur n'est pas très grande et si les appareils de mesure électrique sont d'une classe de précision 0,1 *), la température de l'air peut être définie avec une erreur sensiblement inférieure à un degré.

29. Par le procédé décrit dans le problème précédent, déterminons la résistance du fil d'abord à la température de la neige fondante (R_0), puis à la température recherchée (R_t) et, enfin, dans l'eau bouillante (R_{100}). Ensuite, le système d'équations

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t); \quad R_{100} = R_0 (1 + 100\alpha)$$

nous donnera le coefficient thermique de la résistance

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100},$$

ainsi que la température de l'air dans la chambre :

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \cdot 100.$$

*) Ce sont de très bons appareils ! En technique on emploie généralement des appareils des classes 0,5; 1,0 ou même 2,0.

30. Pour déterminer la durée de la promenade en disposant d'une lampe et d'un compteur électrique donnés dans l'énoncé du problème, il faut procéder de la façon suivante.

Allumer la lampe à l'instant du départ de la fillette tout en notant les indications du compteur. On consulte le compteur une deuxième fois à l'instant de son retour. La consommation d'énergie électrique A étant connue, on peut calculer la durée de la promenade t d'après l'expression

$$t = A/N,$$

où N est la puissance de la lampe électrique déterminée d'après les données marquées sur le culot ou l'ampoule.

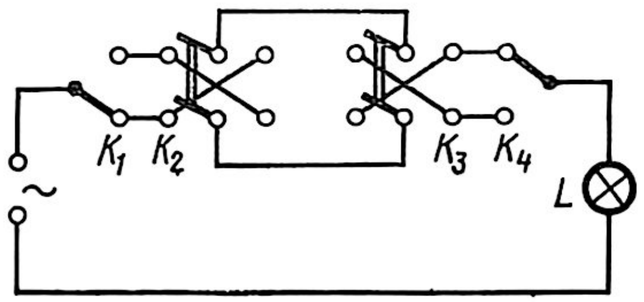
Pour une consommation d'énergie de 1 kWh le disque des compteurs domestiques fait 1 250 tours. Donc, si la puissance de la lampe est de 100 W, en une heure le disque fera 125 tours, nombre qu'on calcule facilement d'après les indications de l'échelle circulaire qui enregistre les tours complets du disque.

31. Des particules chargées qui se déplacent dans un champ magnétique sont déviées dans telle ou telle direction en fonction du signe de leur charge et du sens du vecteur d'induction (des lignes de force).

Aussi, lorsque vous approchez de l'écran de votre téléviseur un aimant de façon que leurs surfaces soient parallèles, l'image télévisée se déplace-t-elle légèrement (il est plus commode d'observer ce phénomène lorsque l'image télévisée est statique, lorsque, par exemple, c'est une vignette ou la mire de réglage). Ensuite, en appliquant la règle de la main gauche, on détermine sans peine la direction des lignes d'induction et, par suite, les pôles de l'aimant.

32. La solution la plus simple pour le cas d'une lampe qui peut être allumée ou éteinte

Fig. 11



à partir de quatre points différents est illustrée par le schéma de la figure 11.

On voit aisément qu'en ajoutant un nombre correspondant de commutateurs on peut monter un schéma qui permet de brancher et de débrancher un appareil à partir d'un nombre *quelconque* de points distincts.

33. Pour qu'un dé de masse m tourne avec le disque suivant une circonférence de rayon R en faisant ν tours par seconde, il faut qu'il subisse de la part du disque une force centripète

$$F_{cp} = mv^2/R = 4\pi^2\nu^2 mR,$$

où v est la vitesse linéaire du centre de gravité du dé.

On voit d'après l'expression ci-dessus que pour une vitesse angulaire constante, la force centripète doit croître de façon monotone en fonction du rayon de rotation. Or, la force de frottement F_{fr} qui joue le rôle de force centripète ne peut dépasser la valeur

$$F_{fr} = kmg,$$

où k est le coefficient de frottement et g l'accélération de la pesanteur.

En mesurant à la règle la valeur de R_d pour laquelle le dé est projeté du disque, écrivons en égalant les expressions ci-dessus:

$$k = 4\pi^2\nu^2 R_d/g.$$

Dans cette expression la grandeur ν est également connue: elle est de 33, 45 ou 78 tours par minute.

34. En attachant le plomb à l'extrémité du fil on obtient un pendule dont la longueur doit être égale à la hauteur de la chambre. La masse du fil étant négligeable, on peut admettre que c'est un pendule « mathématique » et appliquer la formule qui associe la période d'oscillation T à la longueur l et à l'accélération de la gravité g:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}.$$

Après avoir défini à l'aide d'une montre la période d'oscillation du pendule (il suffit à cet effet de calculer le nombre d'oscillations en un temps assez long et de diviser ensuite la deuxième grandeur par la première), on établit d'après la formule ci-dessus la longueur de la suspension l, c.-à-d. la hauteur de la chambre, en cherchant la valeur de g pour la latitude géographique donnée dans un aide-mémoire ou en admettant simplement qu'elle vaut 9,8 m/s². De la même façon on détermine la longueur de la chambre, puis sa largeur, et par simple multiplication, son volume.

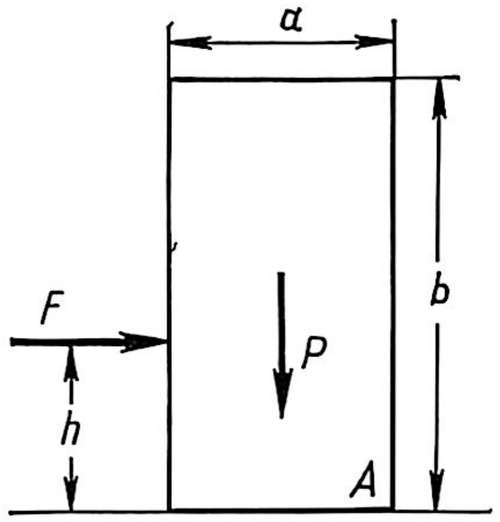
Si le pendule s'avérera trop long (la chambre étant très grande) et s'il est incommode de mesurer sa période d'oscillation, on peut prendre la moitié de la dimension nécessaire en pliant le fil en deux.

35. Le plus simple est probablement de procéder de la façon suivante. En modifiant progressivement la longueur du pendule constitué par le fil et la bille, faisons coïncider les périodes du pendule et du métronome. La longueur du fil l et le rayon de la bille R nous permettront ensuite de calculer d'après la formule

$$T = 2\pi\sqrt{(l+R)/g}$$

la période du pendule égale exactement à celle du métronome. Cette opération doit être réitérée

Fig. 12



pour le plus grand nombre possible de positions de la masse de réglage sur la tige graduée.

Mais on peut aussi ne pas changer la longueur du fil. La période du pendule se calcule alors une seule fois. Ensuite, pour chaque position de la massette on détermine le nombre de battements auquel correspond un nombre entier d'oscillations du pendule. En multipliant ce nombre par la période on trouve le temps de fonctionnement du métronome. Cette grandeur divisée par le nombre de battements du métronome donne la période de ce dernier. La méthode sera décrite avec plus de détails dans la solution du problème n° 80.

36. Plaçons l'échelle contre le mur d'une maison assez haute et traçons un trait à la hauteur de 4,9 m de sa base. Pour tomber de cette hauteur la pierre mettra

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}9 \text{ m}}{9{,}8 \text{ m/s}^2}} = 1 \text{ s}.$$

Maintenant on n'a qu'à choisir la position de la massette de façon qu'une oscillation du pendule dure autant que la chute de la pierre.

37. Si on applique une force horizontale F (voir fig. 12) supérieure à la force de frottement maximale $F_{fr} = kP$ près de la base du barreau,

ce dernier commence à se déplacer. Mais si le point d'application de la force est assez haut, il peut culbuter sans se déplacer. Il en sera ainsi dans le cas où le moment de la force F par rapport, par exemple, à l'axe perpendiculaire au plan du dessin et passant par le point A sera plus grand que le moment de la gravité P par rapport à ce même axe:

$$Fh > P\ a/2,$$

où a est la largeur du barreau.

Il faut trouver un point d'application de la force F tel qu'il corresponde au passage du premier cas au deuxième. Alors le coefficient de frottement pourra être donné par le système

$$F = kP, \quad Fh = P\,\frac{a}{2},$$

dont la résolution conduit à

$$k = a/2h.$$

Il s'ensuit qu'une détermination expérimentale du coefficient de frottement n'est possible que lorsque la hauteur b du barreau vérifie la condition

$$b > a/2\ k.$$

38. Si on place les deux sphères côte à côte sur le plan incliné pour les lâcher simultanément, la sphère de cuivre roulera plus lentement que la sphère d'aluminium. Il en est ainsi du fait que dans un mouvement rotatif (la descente en roulant peut être considérée comme la somme des mouvements de translation et de rotation) l'accélération est définie non par la masse d'un corps, mais par son moment d'inertie qui est plus grand pour la sphère de cuivre, ses éléments isolés étant en moyenne plus éloignés de l'axe de rotation.

(Le moment d'inertie est décrit dans tout cours de physique prévu pour l'enseignement supérieur.)

39. On peut, par exemple, suspendre le moulin à un fil, puis le brancher. Le corps du moulin se mettra alors à tourner dans le sens opposé à celui de la rotation du rotor.

D'ailleurs cette opération n'est pas obligatoire : si on branche le moulin en le tenant dans la main, lors de son démarrage la main percevra le moment qui tend à la tourner dans le sens opposé à celui de la rotation du moteur.

40. Il faut placer la mire par son milieu, par exemple, sur le dos d'une chaise, l'équilibrer et fixer à l'une de ses extrémités le corps à peser. Au deuxième bras du levier ainsi constitué on fixe le nœud de fil métallique. En tirant le fil verticalement vers le bas il est facile d'équilibrer le système. Plus le nœud est proche du point d'appui, plus la force nécessaire pour maintenir l'équilibre est grande. Lorsque la distance est assez petite, cette force peut dépasser la résistance du fil qui se rompt. En appliquant la condition d'équilibre d'un levier, on peut écrire pour le moment de rupture :

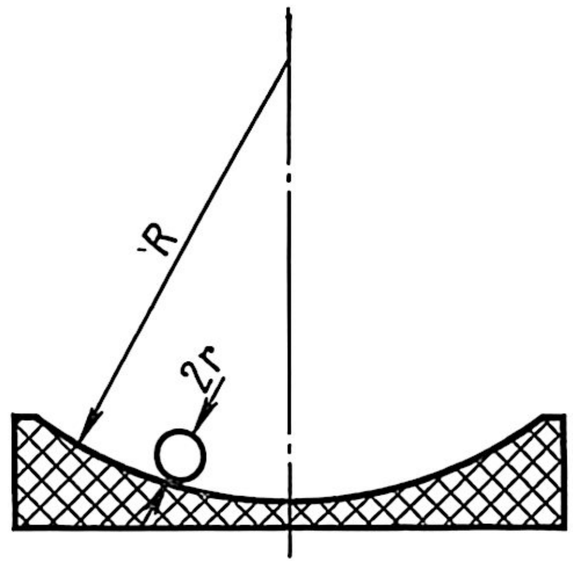
$$Pl_1 = \frac{\pi d^2}{4} \sigma l_2$$

où P est le poids recherché du corps, l_1 la distance entre le corps à peser et l'axe du levier, d le diamètre du fil, σ la charge de rupture du cuivre à la traction (résistance à la traction) et l_2 la distance du nœud au point d'appui.

Les distances l_1 et l_2 se définissent d'après les traits de la mire, alors que la valeur de σ est prise dans un aide-mémoire.

Pour trouver le diamètre du fil on recourt au procédé rendu clair par la figure 8, cette fois encore la mire servant de règle.

Fig. 13



41. Il convient de rendre le miroir horizontal et d'y placer la bille. Si cette dernière ne se trouve pas au point le plus bas, elle se déplacera à la surface du miroir. On s'assure sans peine que si la bille se meut sans rotation (c'est-à-dire si elle glisse à la surface du miroir), son mouvement sera parfaitement analogue à celui d'un pendule dont la longueur de suspension est $R - r$ (fig. 13). Alors, la formule d'un pendule

$$T = 2\pi \sqrt{(R-r)/g}$$

permet de calculer la grandeur qui nous intéresse

$$R = \frac{gT^2}{4\pi^2} + r.$$

Pour définir la période T on a le chronomètre, alors que r est donné par l'énoncé du problème.

Puisque dans les cas courants le frottement est assez fort pour que la bille se déplace en tournant, cette solution s'accorde mal avec l'expérience. En fait

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1{,}4\,(R-r)}{g}} \quad \text{et} \quad R = \frac{gT^2}{5{,}6\pi^2} + r.$$

42. Ils doivent procéder d'après la figure 14. L'adulte passera le premier pour prendre la place

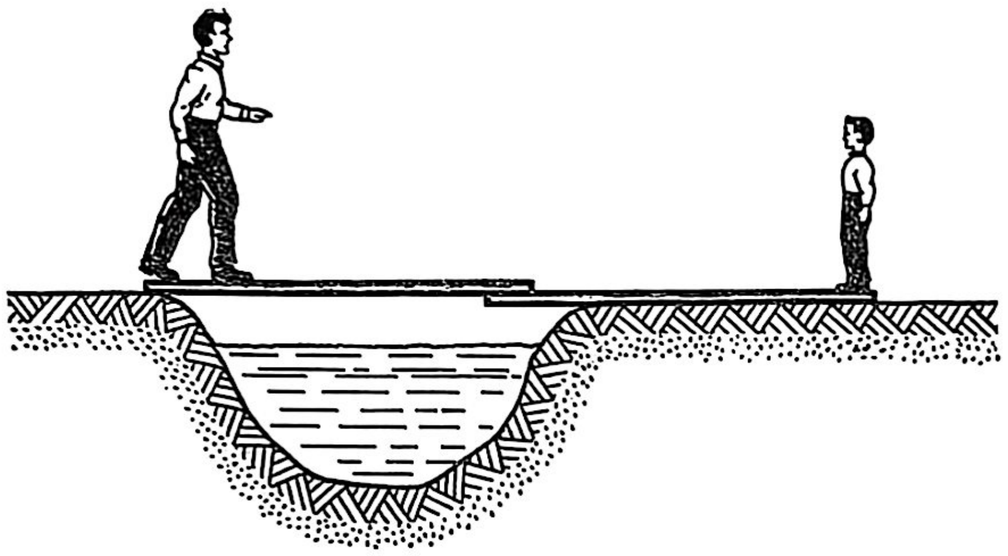


Fig. 14

du garçon et lui permettre ensuite de franchir le ruisseau à son tour.

43. Supposons que l'éclair soit apparu entre les points A et B de deux nuages voisins (fig. 15). Au point C l'homme entend d'abord le son venu du point B, puis du point A plus éloigné. Cette différence est due au fait que la distance AC est plus grande de segment AD que BC. Si les conditions sont favorables (c'est-à-dire si les points A, B, C sont pratiquement alignés), la différence entre AD et AB n'est pas grande. C'est pourquoi en multipliant la durée du tonnerre par la vitesse du son pour calculer la distance AD, on peut admettre que cette dernière est égale à la longueur de l'éclair.

44. Si l'expérimentateur se trouve tout près de la cloche, il perçoit le son directement à l'ins-

Fig. 15

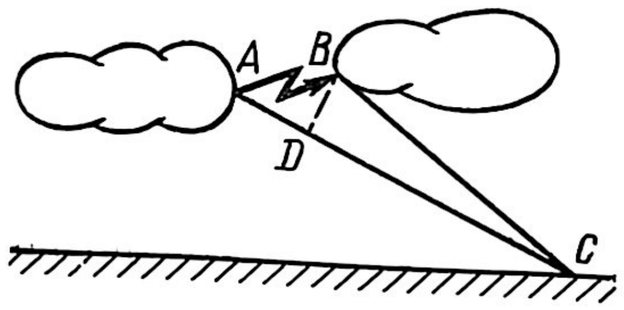
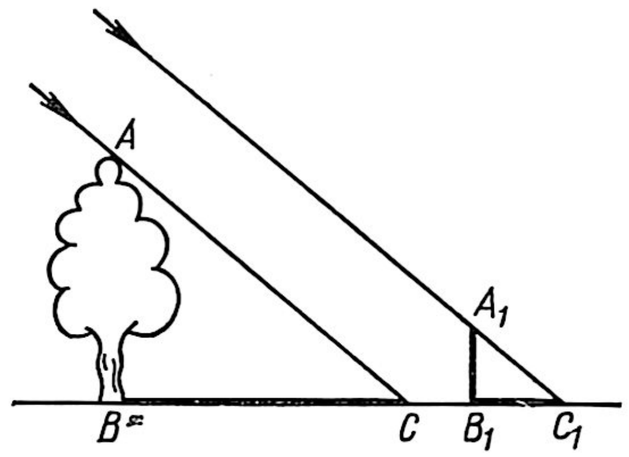


Fig. 16



tant où le coup est porté. Pourtant, lorsqu'on s'éloigne de la cloche, les coups qu'on voit porter et les sons qu'on entend cessent de coïncider du fait que le temps nécessaire aux ondes acoustiques pour arriver à l'observateur est bien plus grand que le temps mis par les ondes lumineuses (dans la plupart des cas importants du point de vue pratique, on peut considérer que la lumière se propage instantanément).

Cette différence augmente d'abord pour diminuer ensuite, et à une certaine distance le coup porté coïncidera de nouveau avec le son perçu. A mesure que l'observateur s'éloigne de la cloche ce phénomène se reproduira périodiquement.

La première fois le coup porté et le son perçu se confondront à la distance que le son couvre dans l'intervalle de temps séparant deux coups. En voyant porter le coup sur la cloche on entendra le son émis par le coup précédent. Puisque d'après l'énoncé l'intervalle entre les coups est d'une seconde, pour calculer la valeur numérique de la vitesse du son, il suffit de mesurer la distance entre la cloche et le point où les coups visibles et les sons qu'ils émettent recommencent à coïncider.

45. La résolution est illustrée par la figure 16. En plaçant la règle verticalement, il faut marquer sur le sol la longueur de l'ombre B_1C_1, puis

mesurer cette longueur ainsi que la longueur BC de l'ombre projetée par l'arbre.

La similitude des triangles ABC et $A_1B_1C_1$ donne :

$$AB = BC \cdot \frac{A_1B_1}{B_1C_1},$$

où A_1B_1 est la longueur connue de la règle.

46. Il faut appuyer sur le bouton du chronomètre à l'instant où la vitesse v_1 affichée au tableau lumineux change en v_2 et arrêter le chronomètre à l'instant du changement successif de v_2 en v_3.

Si le mouvement à la vitesse v_1 commence immédiatement avant le premier affichage, la voiture arrivera au signal lumineux suivant avec le feu vert en couvrant la distance S jusqu'à ce feu en un temps

$$t_1 = S/v_1.$$

Mais si la voiture commence à se déplacer à l'instant où les affichages passent de v_2 à v_3 (c'est-à-dire à l'instant où le chronomètre s'arrête), sa vitesse ne doit pas être inférieure à v_2 et la distance S sera couverte en un temps

$$t_2 = S/v_2.$$

Il est parfaitement clair que la différence $t_1 - t_2$ est égale aux indications du chronomètre τ. Ainsi,

$$\tau = (S/v_1) - (S/v_2),$$

d'où

$$S = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \tau.$$

Par exemple, si $v_1 = 45$ km/h, $v_2 = 50$ km/h et $\tau = 8$ s, on a

$$S = \frac{45 \text{ km/h} \cdot 50 \text{ km/h}}{50 \text{ km/h} - 45 \text{ km/h}} \cdot \frac{8}{3600} \text{ h} = 1 \text{ km}.$$

47. Les garçons doivent se repousser l'un l'autre et mesurer les distances S_1 et S_2 qu'ils couvrent jusqu'à l'arrêt complet. En multipliant ces distances par les masses correspondantes, le coefficient de frottement k et l'accélération de la gravité g, on calcule le travail des forces de freinage

$$A_1 = km_1gS_1 \text{ et } A_2 = km_2gS_2$$

qui, évidemment, sont égales aux énergies cinétiques initiales

$$A_1 = m_1v_1^2/2 \quad \text{et} \quad A_2 = m_2v_2^2/2.$$

On en tire les égalités suivantes

$$kgS_1 = v_1^2/2 \quad \text{et} \quad kgS_2 = v_2^2/2.$$

En les divisant terme à terme, on obtient

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2.$$

D'autre part, les quantités de mouvement résultant de leur mouvement de répulsion doivent être égales pour les deux garçons, c'est-à-dire

$$m_1v_1 = m_2v_2 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2.$$

En égalant les relations des carrés des vitesses, on obtient pour la valeur recherchée

$$\frac{m_2}{m_1} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}}.$$

Puisque les distances S_1 et S_2 sont mesurées, le ploblème est résolu. Il convient seulement de noter qu'un résultat digne de confiance ne s'obtient que si on reprend les mesures à plusieurs reprises et si on cherche la valeur moyenne.

48. Plaçons la mire perpendiculairement au sol et mesurons au décamètre la longueur l_1 de l'ombre qu'elle projette. Puis, nous écartant un peu de la rive, reprenons l'opération pour obtenir la

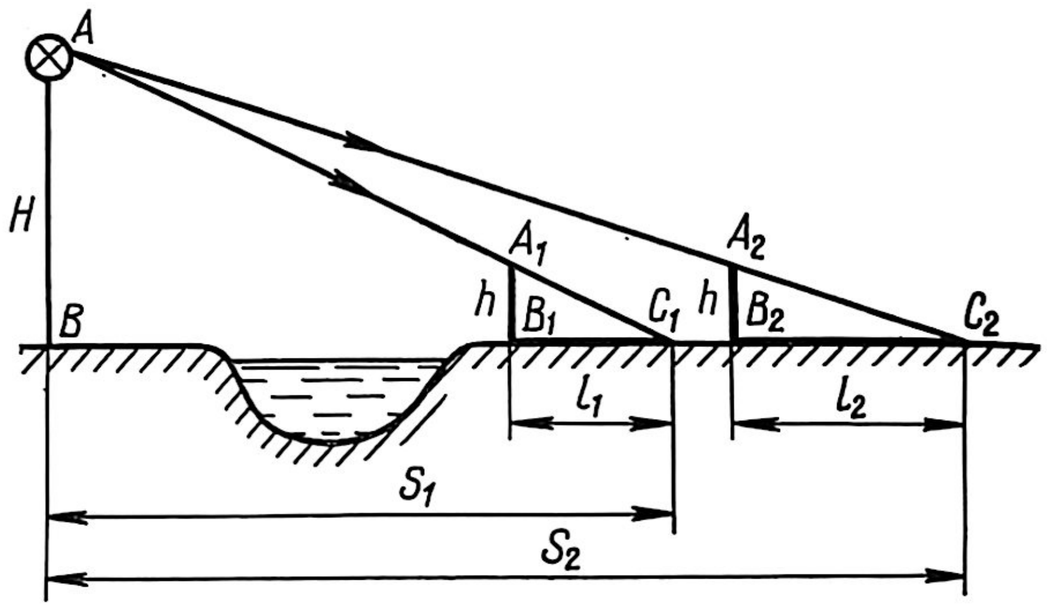


Fig. 17

longueur de l'ombre l_2. Les triangles ABC_1 et $A_1B_1C_1$ étant semblables (voir fig. 17) et les côtés homologues proportionnels, nous pouvons écrire

$$H/h = S_1/l_1$$

(toutes ces notations sont représentées sur la figure). D'une façon analogue, on tire des triangles ABC_2 et $A_2B_2C_2$:

$$H/h = S_2/l_2.$$

Calculons S_1 et S_2 à partir des relations obtenues:

$$S_1 = \frac{H}{h} l_1 \quad (1), \quad S_2 = \frac{H}{h} l_2 \quad (2).$$

En retranchant de la deuxième expression la première, on obtient:

$$S_2 - S_1 = \frac{H}{h} (l_2 - l_1).$$

D'où la hauteur du poteau H

$$H = \frac{S_2 - S_1}{l_2 - l_1} h.$$

Pour répondre à la première question du problème, divisons l'équation (1) par l'équation (2):

$$S_1/S_2 = l_1/l_2.$$

En profitant des propriétés des proportions dérivées, on a:

$$\frac{S_1}{S_2 - S_1} = \frac{l_1}{l_2 - l_1},$$

d'où la distance au poteau

$$S_1 = \frac{S_2 - S_1}{l_2 - l_1} l_1.$$

Les grandeurs h, l_1, l_2 et $S_2 - S_1$ nécessaires pour calculer H et S_1 sont mesurées au décamètre.

49. Il existe, entre autres, deux solutions suivantes.

A. Rendons le tube du pistolet bien vertical et tirons pour mesurer avec un décamètre la hauteur h atteinte par la balle. D'après la loi de conservation de l'énergie

$$\frac{mv^2}{2} = mgh$$

on obtient sans peine l'expression suivante de sa vitesse

$$v = \sqrt{2gh}.$$

B. On peut également tirer dans le sens horizontal et mesurer la distance l que couvrira la balle. Si la hauteur du tube au-dessus du niveau de sol est h, la durée du vol de la balle est

$$t = \sqrt{2h/g},$$

dans le sens horizontal et la distance parcourue pendant cet intervalle de temps

$$l = vt.$$

En éliminant entre ces deux équations le temps t, on obtient:

$$v = l\sqrt{g/2h}.$$

50. En rendant le tube du pistolet bien vertical, déterminons à l'aide d'un chronomètre le temps t_0 depuis le coup parti jusqu'à l'instant où la balle retombe au sol.

La hauteur h atteinte par un corps lancé verticalement à une vitesse initiale v_0 en un temps t après le lancer peut se calculer d'après l'équation

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

En posant dans cette expression $h = 0$, ce qui correspond au début et à la fin du vol, on obtient une équation de second degré incomplète

$$\frac{gt^2}{2} - v_0 t = 0,$$

dont les solutions sont de la forme

$$t_1 = 0 \text{ et } t_2 = 2v_0/g.$$

On voit sans peine que la première se rapporte à l'instant où l'on tire, et la deuxième, à l'instant où la balle retombe au sol. En admettant donc que t_2 est égal à la durée totale du vol de la balle t_0, on a $t_0 = 2v_0/g$, d'où

$$v_0 = gt_0/2.$$

La solution peut aussi être bien plus simple. La vitesse de la balle étant nulle au point supérieur de la trajectoire, la relation

$$v_t = v_0 - gt = 0$$

permet de trouver la durée de la montée $t = v_0/g$. Cela étant, on a

$$t_0 = 2v_0/g,$$

puisque la balle met autant de temps pour monter que pour tomber.

Il est vrai que cette dernière assertion impose une justification qui, au fond, n'est pas très simple, mais les raisonnements exposés peuvent s'avérer utiles pour des problèmes plus compliqués.

51. Invitons le garçon et la fille à lancer la balle horizontalement à tour de rôle. Mesurons avec le décamètre les portées des lancers S_1 et S_2.

La distance couverte par la balle peut s'écrire comme le produit de la vitesse initiale par le temps du déplacement. Cette dernière grandeur s'obtient en considérant le mouvement dans le sens vertical. Si la hauteur à laquelle commence le vol est h, on a

$$t = \sqrt{2h/g},$$

et pour les distances de vol, on obtient respectivement

$$S_1 = v_1\sqrt{2h_1/g} \text{ et } S_2 = v_2\sqrt{2h_2/g}.$$

En divisant la première expression par la deuxième, on obtient pour le rapport des distances de vol

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_1}{v_2}\sqrt{\frac{h_1}{h_2}},$$

d'où le rapport des vitesses:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_1}{S_2}\sqrt{\frac{h_2}{h_1}}.$$

De la sorte, pour résoudre le problème il suffit de mesurer avec le décamètre les distances des lancers et les hauteurs à partir desquelles commencent les vols de la balle. Pour simplifier les mesures et la résolution, on peut égaler h_1 et h_2 en mettant celui qui est moins haut sur un sup-

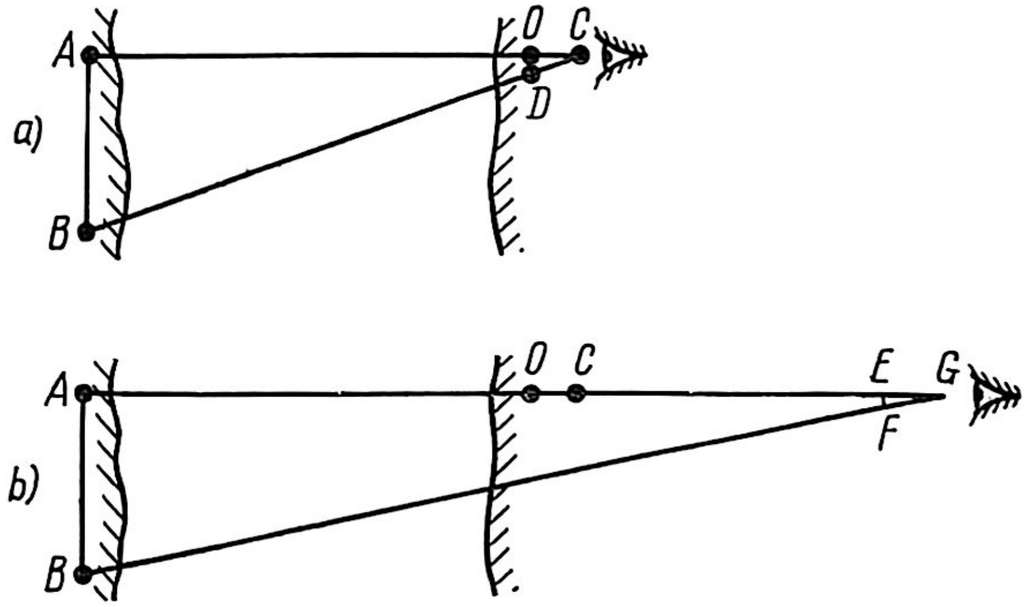


Fig. 18

port de hauteur convenable. Il vient alors

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{S_1}{S_2}.$$

52. En se tenant tout près de la rivière, choisissez sur la rive opposée, dans la proximité immédiate de l'eau, deux objets bien en vue et trouvez un brin d'herbe tel que tenu à bout de bras il couvre l'intervalle entre les objets choisis. Bien entendu, pendant cette opération, il faut fermer l'un des yeux.

Pliez le brin d'herbe en deux et reculez de la rive jusqu'à ce qu'il couvre de nouveau l'intervalle entre ces mêmes objets. Ensuite, mesurez la distance entre les deux points où vous vous trouviez. Elle sera égale exactement à la largeur de la rivière.

En effet, la similitude des triangles ABC et ODC (voir fig. 18, *a*) permet d'écrire

$$\frac{AB}{OD}=\frac{AC}{OC}, \qquad (1)$$

où AB est la distance entre les objets choisis, AC la distance jusqu'à ces objets du premier point

d'observation (largeur de la rivière), OD la dimension du brin d'herbe et OC la longueur du bras étendu.

D'une façon analogue, de la similitude des triangles ABG et EFG (voir fig. 18, *b*) il découle

$$\frac{AB}{EF}=\frac{AG}{EG},$$

ou, puisque $EF = OD/2$ et $EG = OC$,

$$\frac{2AB}{OD}=\frac{AG}{OC}. \qquad (2)$$

En divisant les égalités (2) et (1) terme à terme, on obtient:

$$2 = AG/AC,$$

d'où

$$AC = AG/2 = CG.$$

La distance CG se mesure en pas.

53. La collection d'objets donnée par les conditions du problème permet de construire facilement une pile électrique en utilisant comme électrolyte la solution de salmiac dans l'eau et comme électrodes, le fil de cuivre et la plaque de zinc. En perçant le bouchon par le fil on peut confectionner des « électrodes flottantes », comme sur la figure 19.

Si on ferme les électrodes par un solénoïde composé de quelques spires de fil, un courant apparaît dans le circuit et le solénoïde s'oriente dans le sens du méridien magnétique. La polarité de la pile étant connue (cuivre, pôle positif; zinc, pôle négatif), il n'est pas difficile, en appliquant, par exemple, la règle du tire-bouchon, de définir les pôles magnétiques du solénoïde et puis, la direction des pôles Nord et Sud de la Terre.

54. Utilisons d'abord le rapporteur et le plomb pour faire un éclimètre élémentaire (instrument pour la mesure de l'angle α entre l'horizontale et

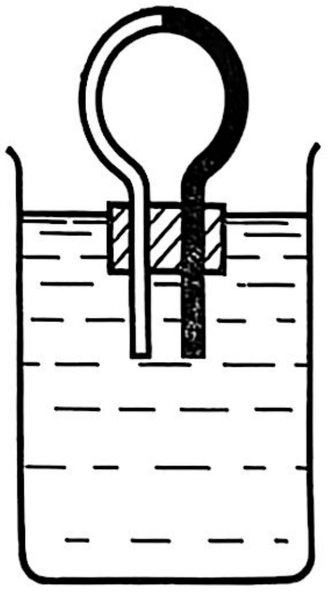


Fig. 19

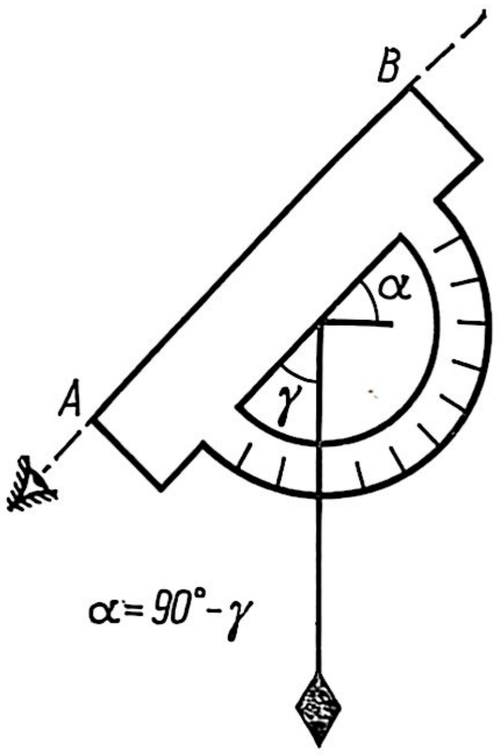


Fig. 20

la direction AB vers un point) schématisé sur la figure 20. Posons la soucoupe contenant le mercure sur le sol et éloignons-nous à une distance d'où l'on peut voir la réflexion du sommet de la tour dans la soucoupe, puis mesurons avec l'éclimètre les angles α et β représentés sur la figure 21.

Dans le triangle ABC

$$AB = BC \operatorname{cotg} \alpha = (N - h) \operatorname{cotg} \alpha.$$

D'autre part,

$$AB = AE + EB,$$

avec

$$AE = OE \operatorname{cotg} \beta = h \operatorname{cotg} \beta \quad \text{et} \quad EB = DC$$
$$\operatorname{cotg} \beta = L \operatorname{cotg} \beta.$$

En portant ces valeurs dans la formule précédente et en égalant les deux expressions de AB, on obtient:

$$(L - h) \operatorname{cotg} \alpha = h \operatorname{cotg} \beta + L \operatorname{cotg} \beta,$$

d'où

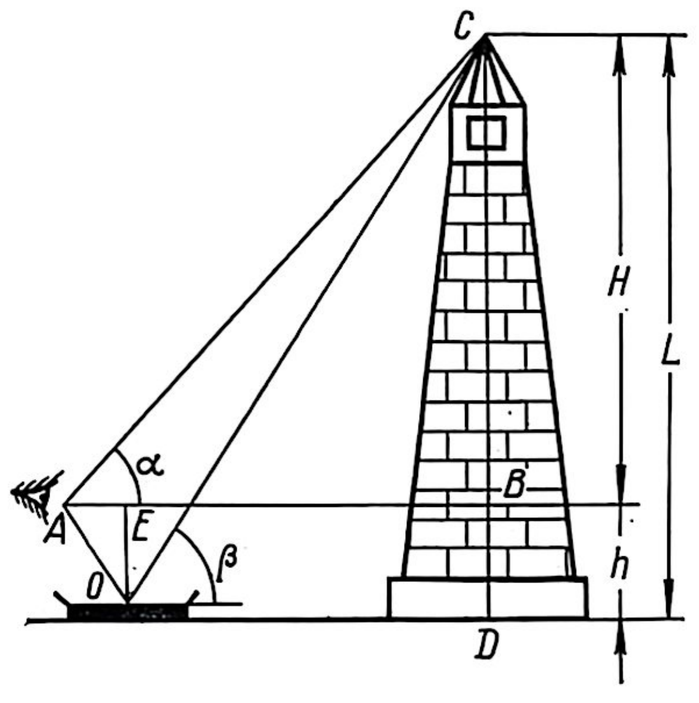
$$L = \frac{\operatorname{cotg} \alpha + \operatorname{cotg} \beta}{\operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{cotg} \beta} h = \frac{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha} h,$$

où h est la distance du sol aux yeux de l'observateur, donnée par l'énoncé du problème.

55. A mesure que la hauteur au-dessus du niveau de la mer augmente, la pression atmosphérique baisse. D'autre part, avec la diminution de la pression, la température d'ébullition de l'eau baisse également. Cette circonstance est parfois mise à profit par les alpinistes pour définir la hauteur où ils se trouvent. Des résultats précis s'obtiennent en consultant des tableaux spéciaux, mais pour des calculs grossiers il suffit de retenir que le point d'ébullition de l'eau baisse d'environ 0,3 °C tous les 100 m de hauteur.

56. Supposons qu'à une distance inconnue R de la source lumineuse, l'éclairement mesuré à l'aide d'un luxmètre est E_1. Eloignons-nous à une distance supplémentaire d et procédons encore à la mesure au luxmètre. Supposons que dans le deuxième cas il indique E_2. D'après les lois

Fig. 21



de l'éclairement on peut écrire :

$$E_1 = \frac{I}{R^2}, \qquad E_2 = \frac{I}{(R+d)^2}.$$

En calculant R d'après la première expression et en portant la valeur obtenue dans la deuxième, on obtient une équation irrationnelle par rapport à l'intensité lumineuse I :

$$E_2 = \frac{I}{(\sqrt{I/E_1}+d)^2}.$$

La valeur de d nécessaire pour les calculs s'obtient à l'aide du décamètre.

57. Un corps fixe par rapport à un système en rotation, par exemple une mouche qui se tient sur le disque d'un électrophone, est soumis *dans ce système* à une force dite force d'inertie centrifuge qui tend à éloigner le corps de l'axe de rotation. Mais si le corps est animé d'un mouvement par rapport au système en rotation (la mouche commence à se déplacer), indépendamment de la direction du mouvement il apparaît une autre force dite de Coriolis qui s'exerce sous un angle droit à la vitesse de mouvement du corps.

En se déplaçant à la surface terrestre les hommes ne ressentent pas cette force pour la seule raison qu'elle est très faible, la rotation de la Terre étant relativement lente. Or, c'est précisément la force de Coriolis qui fait que dans l'hémisphère Nord, les rives droites des cours d'eau sont plus affouillées, alors que dans l'hémisphère Sud, ce sont les rives gauches (cette loi a été énoncée en 1857 par le géographe russe K. Ber). La même cause fait que les vents et les courants marins de l'hémisphère Nord tournent à droite, et dans de l'hémisphère Sud, à gauche.

La force de Coriolis ne disparaît que dans le cas où la vitesse de l'objet est orientée suivant l'axe de rotation du système. Inversement, si le

mouvement est perpendiculaire à cet axe, la force de Coriolis est maximale.

A partir de ces renseignements, on peut résoudre le problème de la façon suivante.

Il suffit de se mettre en face de la plate-forme et de lancer sur cette dernière la bille. La rotation de la plate-forme et la force de Coriolis due à cette rotation font que la trajectoire de la bille ne sera pas rectiligne. Si on observe un écart à droite, la plate-forme tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (si on regarde d'en haut) et inversement.

Notons que pour résoudre le problème on peut se passer des forces de Coriolis en appliquant seulement le principe de l'inertie.

58. La perception du son est due aux ondes élastiques qui se propagent dans l'air et dont la fréquence varie de 20 à 20 000 Hz. Puisque les oscillations longitudinales sont les seules oscillations possibles dans les gaz, la propagation des ondes sonores dans l'air provoque l'alternance des zones de compression et de détente du gaz, qui se déplacent de la source vers l'observateur.

Désignons la fréquence des oscillations produites par la sirène (c'est-à-dire le nombre d'oscillations émises en 1 s) par ν_0 et leur vitesse de propagation dans l'air par C.

Si le train électrique était au repos, à la fin de chaque seconde (c'est-à-dire à l'instant où la sirène lançait la ν_0-ième oscillation), l'oscillation émise au début de cette seconde s'éloignerait de la sirène à la distance C, de sorte que les zones voisines de compression (ou de détente) seraient distantes l'une de l'autre de $\lambda_0 = C/\nu_0$.

Or, en fait, la sirène se déplace avec le train à la vitesse v que l'observateur doit définir. C'est pourquoi les oscillations émises au début et à la fin de chaque seconde par un train qui *s'approche* sont séparées par une distance $C - v$, et les zones

de détentes voisines, par l'intervalle $\lambda_1 = (C - v)/\nu_0$. Les oscillations successives se propageant dans l'air toujours à la vitesse C, le temps entre les arrivées de deux oscillations est

$$T_1 = \frac{\lambda_1}{C} = \frac{C - v}{C\nu_0}.$$

Donc, la fréquence des oscillations perçues par l'observateur:

$$\nu_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{C}{C - v} \cdot \nu_0,$$

c'est-à-dire elle est plus grande que dans le cas d'une sirène fixe.

Un raisonnement analogue permet d'obtenir pour la fréquence sonore d'une sirène qui *s'éloigne* la valeur

$$\nu_2 = \frac{C}{C + v} \cdot \nu_0$$

(plus petite que celle émise par une source sonore fixe par rapport à l'observateur) *).

En divisant les égalités terme à terme, on obtient

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{C + v}{C - v}.$$

En désignant par K pour abréger le premier membre, on trouve par des transformations simples

$$v = \frac{K - 1}{K + 1} \cdot C.$$

*) La fréquence des oscillations peut varier également suivant que l'observateur s'approche ou s'éloigne d'une source fixe, c'est-à-dire lorsque leur position réciproque change quelle qu'en soit la cause. Ce phénomène a été théoriquement prévu pour les oscillations optiques par le physicien et astronome autrichien C. Doppler (d'où le terme d'« effet Doppler »). En 1845, le savant hollandais H. Bayes-Ballot a pour la première fois confirmé expérimentalement l'existence de l'effet Doppler pour les ondes sonores.

Ainsi, si l' on connaît comment varie la hauteur du ton d'une sirène qui passe tout près de l'observateur, on peut trouver la vitesse du train électrique, le calcul ainsi réalisé pouvant être assez précis. En effet, dans le domaine des fréquences allant jusqu'à 4 000 Hz l'oreille humaine est capable de distinguer les tons qui diffèrent en hauteur d'une oscillation par seconde, c'est-à-dire ceux qui pour une fréquence de 500 Hz diffèrent de 0,002. Or, lorsque la vitesse du train passe de 20 m/s (72 km/h) à 21 m/s (75,6 km/h), la relation ν_1/ν_2 passe de 1,125 à 1,130 variant ainsi de 0,005.

59. Les particules d'une mousse de savon en tombant dans de l'eau pure se dispersent dans toutes les directions, ce qui s'explique par la diminution des forces de tension superficielle due à la dissolution du savon.

60. Si les garçons se rapprochent l'un de l'autre en tirant sur la corde, les accélérations des canots ne peuvent être les mêmes que dans le cas où leurs masses sont égales, puisque les forces appliquées aux canots sont égales en vertu du principe de l'action et de réaction:

$$a_1 = F/m_1 \text{ et } a_2 = F/m_2.$$

Mais les trajets parcourus par les canots jusqu'à leur rencontre doivent être alors égaux eux aussi, puisque, bien entendu, les temps de leur déplacement sont les mêmes:

$$S_1 = a_1 t^2/2 \text{ et } S_2 = a_2 t^2/2.$$

Ainsi, les garçons peuvent être sûrs que les masses de leurs canots sont égales s'ils arrivent à réaliser l'égalité des trajets parcourus par les canots jusqu'à leur rencontre. La comparaison des trajets ne présente aucune difficulté si on établit avec la corde des distances égales.

61. Supposons qu'un homme se tienne sur le nez d'un canot fixe. La somme des quantités de mouvement de l'homme et du canot est alors nulle. La résistance de l'eau pouvant être négligée pour de faibles vitesses, cette somme ne doit pas non plus changer dans le cas où l'homme se met à se déplacer vers l'arrière. On peut donc écrire:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0,$$

où les indices 1 et 2 désignent les grandeurs relatives à l'homme et au canot respectivement.

En multipliant les deux membres de l'équation par le temps nécessaire à l'homme pour passer du nez à l'arrière on obtient:

$$m_1 v_1 t + m_2 v_2 t = 0, \quad \text{ou} \quad m_1 S_1 + m_2 S_2 = 0,$$

d'où

$$m_2 = -m_1 \frac{S_1}{S_2}.$$

Le signe « moins » traduit seulement le fait que le canot se déplace dans le sens opposé à celui de l'homme et, de ce fait, peut ne pas être pris en considération:

$$m_2 = m_1 \frac{S_1}{S_2}.$$

Dans cette expression, S_1 et S_2 sont les déplacements de l'homme et du canot par rapport à l'eau fixe (déplacements « absolus »). En retenant que l'homme couvre par rapport au canot la distance l, la relation entre ces déplacements peut s'écrire

$$S_1 = l - S_2.$$

Ainsi,

$$m_2 = m_1 \frac{l - S_2}{S_2}.$$

Par conséquent, en mesurant la longueur du canot et le chemin qu'il parcourt, on peut calculer la masse du canot, car la masse de l'homme est donnée par l'énoncé.

Puisque la dernière expression comprend le *rapport* des segments $l - S_2$ et S_2, il n'est pas obligatoire de les exprimer en unités généralement admises; on peut utiliser, par exemple, une petite baguette et déterminer combien de fois elle se range dans ces segments. On voit donc qu'on peut très bien se passer de la corde. Toutefois, il est plus commode de prendre d'abord deux bouts de corde égaux aux segments S_2 et $l - S_2$, puis les mesurer.

62. Le touriste a dû brancher son transistor à l'instant où il a entendu le premier signal horaire, tout en consultant sa montre. La deuxième fois il a marqué l'heure en entendant le même signal horaire parvenu du haut-parleur de la station. Le produit de la différence des temps Δt par la vitesse du son v donne la distance entre le point d'arrêt et la station:

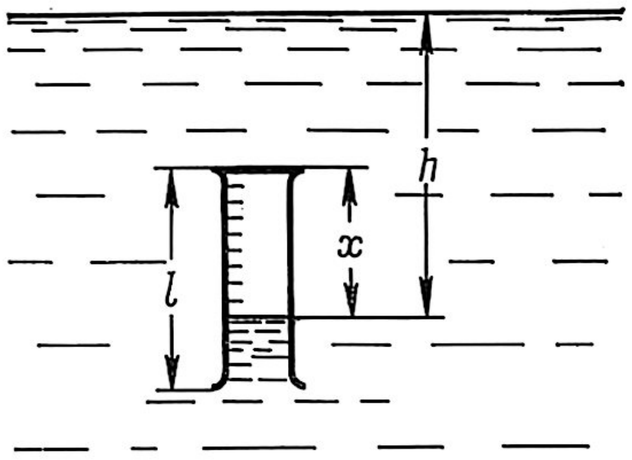
$$l = v \cdot \Delta t.$$

On peut calculer que pour une distance de l'ordre de 3 km, l'erreur relative du calcul fait au plus 10 %, ce qui n'est déjà pas si mal.

On voit aisément que le calcul peut se faire également sans les signaux horaires: à cet effet on peut choisir la fin d'une phrase quelconque transmise par radio.

Toutefois, en utilisant les signaux horaires, on peut définir même sans une montre la distance approchée de la station si cette distance n'est pas trop grande. En effet, supposons que le cinquième signal (rappelons qu'en U.R.S.S. les signaux horaires sont transmis au nombre de six et on les transmet à des intervalles d'une seconde, le dernier signal donnant le temps exact) que les touristes entendent grâce à leur transistor coïncide avec le premier signal parvenu du haut-

Fig. 22



parleur de la station. Cela signifie que pour parcourir le trajet de la station au camp le son a mis 4 secondes. En multipliant ce temps par la vitesse du son on trouve la distance de la station en ligne droite.

On voit sans peine que le procédé utilisé dans ce cas rappelle celui du problème n° 44.

63. Pour résoudre ce problème, il faut appliquer la loi de Boyle-Mariotte. L'homme grenouille doit aller jusqu'au fond et, tenant l'éprouvette de manière que le trou soit dirigé vers le bas, lire le niveau de l'eau qui s'y introduit (voir fig. 22).

Sous une pression atmosphérique normale p_0, l'air de l'éprouvette occupait le volume

$$V_1 = lS,$$

où l est la hauteur et S la section transversale de l'éprouvette.

Au fond du lac la pression croît jusqu'à

$$p = p_0 + \rho gh,$$

où h est la profondeur cherchée du lac, ρ la densité de l'eau et g l'accélération de la gravité. Le volume de l'air dans l'éprouvette diminue donc jusqu'à

$$V_2 = xS,$$

où x est la hauteur de la colonne d'air dans l'éprouvette au fond du lac.

En admettant qu'à des profondeurs différentes la température de l'eau et sa densité soient invariables, on a d'après la loi de Boyle-Mariotte:

$$p_0 lS = (p_0 + \rho gh)\, xS,$$

d'où on obtient par des transformations simples:

$$h = \frac{p_0}{\rho g} \cdot \frac{l - x}{x}.$$

Dans ces conditions il importe peu quelles sont les unités employées pour exprimer les grandeurs l et x. En particulier, on peut les porter sur l'éprouvette en la graduant. Le fait est que l'expression finale comporte le rapport des grandeurs homogènes $l - x$ et x, dont la valeur ne dépend évidemment pas des unités de mesure de la longueur. Comme la pression atmosphérique change relativement peu, nous pouvons considérer qu'elle est constante et égale à $1{,}013 \cdot 10^5$ N/m². De même, la densité de l'eau (1 000 kg/m³) et l'accélération de la gravité (9,8 m/s²) sont des valeurs pratiquement constantes.

Evidemment, l'éprouvette peut être remplacée par un récipient conique. Dans ce cas, la loi de Boyle-Mariotte s'écrira

$$p_0 V_1 = (p_0 + \rho gh)\, V_2,$$

où V_1 et V_2 sont les volumes occupés par l'air dans le récipient gradué respectivement à la surface et au fond du lac, que la graduation permet d'évaluer.

Il faudrait que dans les deux cas les traits de la graduation soient portés tout le long du récipient. S'il n'en est pas ainsi, il faut y verser de l'eau de façon que son niveau coïncide avec l'origine de l'échelle.

64. Il faut fixer le poids au fil de la façon représentée sur la figure 23, puis tirer dans le sens de la flèche a. Les forces F et P sont liées

par la relation

$$P = 2F \cos (\alpha/2),$$

d'où

$$F = \frac{P}{2 \cos (\alpha/2)} = \frac{mg}{2 \cos (\alpha/2)}.$$

En tendant progressivement le fil nous augmentons l'angle α ; il en résulte que l'effort de tension F augmente lui aussi. En lisant sur le rapporteur l'angle qui correspond à la rupture, on peut calculer la charge admissible.

Même si le fil se rompt à $\alpha = 0°$, il faut le plier en deux et reprendre l'opération sans oublier de diviser par deux le résultat final.

65. La formule

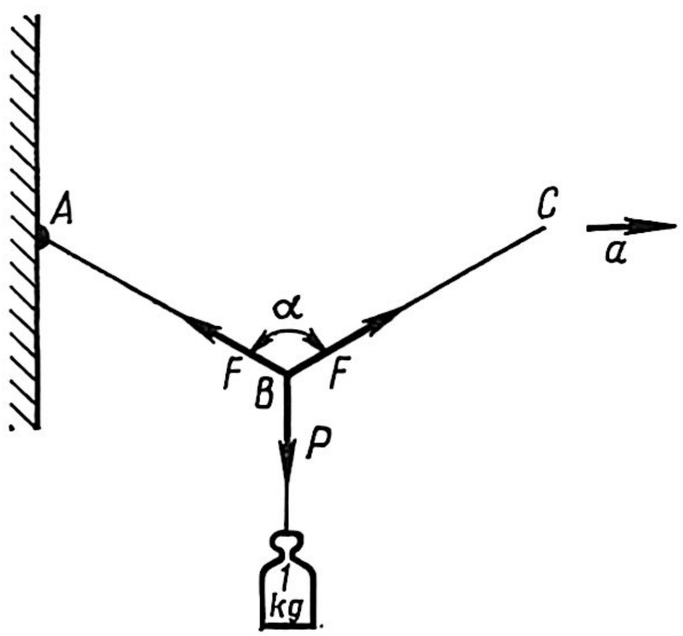
$$F = \frac{mg}{2 \cos (\alpha/2)}$$

du problème précédent peut se mettre sous la forme

$$F = \frac{mg}{2\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} = \frac{mg}{2\sqrt{1 - \left(\frac{AC : 2}{AB}\right)^2}}.$$

En tendant le fil, il faut obtenir la distance entre A et C à l'instant de rupture ainsi que la demi-

Fig. 23



longueur AB du fil. Pour réaliser ces mesures, on se sert de décamètre.

66. Fixons le poids au fil et faisons-le tourner de plus en plus vite jusqu'à la rupture du fil. La force centripète F_{cp} qui s'exerce sur un corps animé d'un mouvement rotatif est

$$F_{cp} = \frac{mv^2}{R} = 4\pi^2 \nu^2 mR,$$

où ν est le nombre de tours par unité de temps (en 1 s), m la masse du corps en rotation, R le rayon de rotation, v la vitesse linéaire du corps.

On voit sans peine de l'expression ci-dessus que la force centripète augmente avec la fréquence de rotation. Mais en réalité cette augmentation ne peut être infinie, puisque la force centripète est due à la tension du fil, dont la charge ne peut dépasser

$$\frac{\pi d^2}{4} \sigma,$$

où d est le diamètre du fil et σ la charge de rupture du matériau dont il est fait.

En égalant les deux dernières expressions, on obtient pour la grandeur qui nous intéresse :

$$\sigma = \frac{16\pi \nu^2 mR}{d^2}.$$

La fréquence de rotation critique nécessaire pour le calcul s'obtient en comptant directement les tours pendant un certain temps à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse critique.

67. D'abord on définit au chronomètre le temps t_1 passé entre la chute de la pierre dans l'eau et l'arrivée à la rive des ondes que cette chute a produites, ainsi que le nombre n des ondes qui atteignent la rive en un temps t_2. Bien que sans grande précision, la distance entre deux « bosses » ou deux « creux », c.-à-d. la

longueur λ des ondes, peut être déterminée au décamètre.

Il est évident que la distance recherchée peut s'écrire

$$x = vt_1,$$

où v est la vitesse de propagation des ondes. Comme

$$v = \lambda\nu$$

(ν est la fréquence d'oscillation de l'onde; de plus, $\nu = n/t_2$), on a

$$x = \lambda\nu t_1 = \lambda \frac{t_1}{t_2} n.$$

68. Si le train se déplace de gauche à droite à la vitesse v_t, les gouttes ont par rapport à ce train une vitesse v'_t égale en grandeur à v_t mais de sens opposé. En outre, les gouttes de pluie se déplacent par rapport au wagon de haut en bas avec une vitesse qu'il faut déterminer et que nous désignons par v_x. Le vecteur de la vitesse résultante v, comme le montre la figure 24, forme avec la verticale un angle α qui satisfait à la condition

$$\operatorname{tg}\alpha = v'_t/v_x.$$

On tire de cette expression la vitesse de chute des gouttes

$$v_x = v'_t \operatorname{cotg}\alpha.$$

L'angle α se définit au rapporteur, alors que la vitesse v_t se calcule d'après le temps mis par le train pour passer d'une borne kilométrique à l'autre (on voit très bien ces bornes, même par un temps pluvieux).

69. Par rapport à une voiture, une goutte de pluie participe à deux mouvements simultanément, l'un suivant la verticale et l'autre suivant

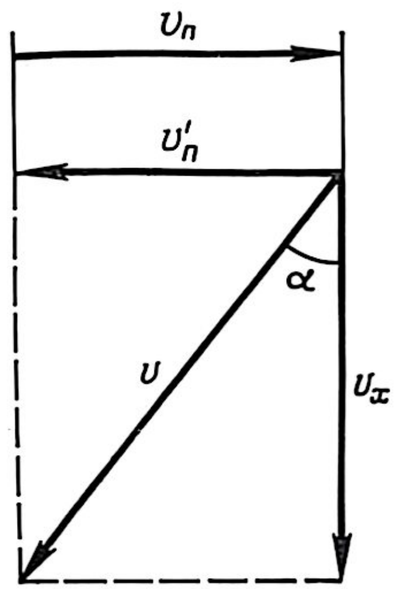


Fig. 24

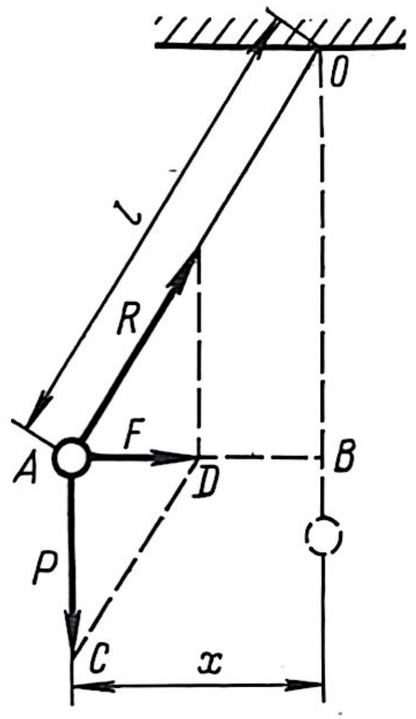


Fig. 25

l'horizontale. La vitesse résultante v est dirigée sous un angle α par rapport à la verticale et on a (voir le problème précédent)

$$\operatorname{tg}\alpha = v_v/v_x,$$

où v_v est la vitesse de la voiture et v_x la vitesse de chute d'une goutte. La tangente de l'angle α peut être calculée en mesurant les côtés du triangle rectangle formé par la trace de la goutte (hypoténuse) et le cadre de la vitre (côtés); la vitesse de la voiture est donnée par le compteur de vitesse. Maintenant on peut calculer v_x.

70. Fixons le poids au fil et suspendons le pendule ainsi obtenu au plafond du wagon. Si le mouvement du train est un mouvement uniformément accéléré, le pendule déviera jusqu'au moment où la résultante F de la gravité P et de la tension du fil R acquiert une valeur suffisante pour communiquer au poids l'accélération du train.

La similitude des triangles AOB et ACD (voir fig. 25) entraîne

$$\frac{AD}{AC}=\frac{AB}{OB}, \quad \text{ou} \quad \frac{ma}{mg}=\frac{x}{\sqrt{l^2-x^2}},$$

d'où l'on tire

$$a=g\frac{x}{\sqrt{l^2-x^2}};$$

l est la longueur du pendule, x son écart de la position d'équilibre suivant l'horizontale. Ainsi, en mesurant la longueur de la suspension et l'écart du pendule, on peut calculer l'accélération du train.

71. Du triangle ACD représenté sur la figure 25 on obtient:

$$(AD)^2=(DC)^2-(AC)^2 \quad \text{ou} \quad F=\sqrt{R^2-P^2}.$$

Cette dernière égalité peut être mise sous la forme

$$ma=\sqrt{R^2-P^2},$$

d'où

$$a=\frac{\sqrt{R^2-P^2}}{m}=g\frac{\sqrt{R^2-P^2}}{P}=g\sqrt{\left(\frac{R}{P}\right)^2-1},$$

où P sont les indications du dynamomètre dans un train au repos ou animé d'un mouvement uniforme et R, les indications de ce dernier dans un train animé d'un mouvement uniformément accéléré.

72. En mesurant au rapporteur l'angle AOB (voir fig. 25), on obtient de la relation

$$\operatorname{tg}\widehat{AOB}=\operatorname{tg}\widehat{ACD}=\frac{F}{P}=\frac{am}{mg}=\frac{a}{g}$$

l'accélération du train:

$$a = g \operatorname{tg}\alpha.$$

73. Lorsque la température varie de t_1 à t_2, le rayon de la roue change

$$\text{de } r_1 = r_0(1+\alpha t_1) \quad \text{à} \quad r_2 = r_0(1+\alpha t_2),$$

et la longueur de sa circonférence, de

$$l_1 = 2\pi r_1 = 2\pi r_0(1+\alpha t_1) = l_0(1+\alpha t_1)$$

à

$$l_2 = l_0(1+\alpha t_2).$$

C'est pourquoi à une certaine distance L, le nombre de tours changera

$$\text{de } N_1=\frac{L}{l_1}=\frac{L}{l_0(1+\alpha t_1)} \quad \text{à} \quad N_2=\frac{L}{l_0(1+\alpha t_2)}.$$

En divisant ces expressions terme à terme, on obtient:

$$\frac{N_1}{N_2}=\frac{1+\alpha t_1}{1+\alpha t_2},$$

d'où

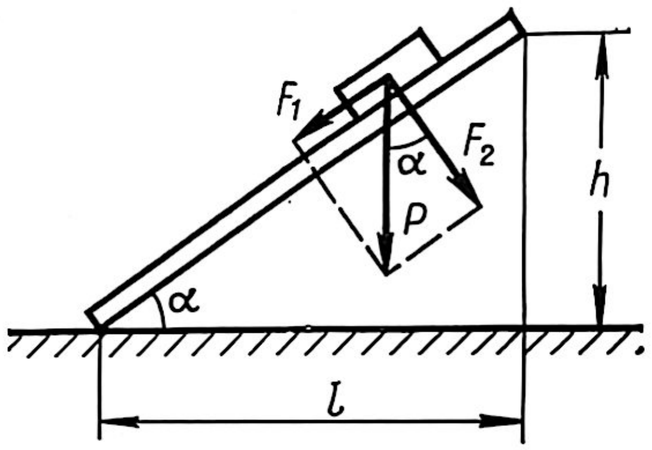
$$\alpha=\frac{N_2-N_1}{N_1t_1-N_2t_2}.$$

N_1 et N_2 sont donnés par le compte-tours, alors que t_1 et t_2 le sont par le thermomètre.

Lorsque la température monte de —25 °C à +25 °C, une roue en acier ($\alpha = 1{,}2\cdot10^{-5}$ degré$^{-1}$) de rayon 0,5 m ne fait sur un parcours de 100 km que 19 tours de moins, cette méthode ne pouvant donc pas prétendre à une précision élevée.

74. Après avoir accéléré la voiture, débrayez en notant la vitesse v lue sur le compteur et déterminez à l'aide de ce même appareil la distance S couverte par la voiture jusqu'à l'arrêt. (Cette distance se calcule aisément avec une précision de 50 m et lorsqu'on a acquis quelque expérience, de 30 m d'après le chiffre (centaines de mètres) affiché à droite sur le compteur de vitesse.) En égalant l'énergie cinétique de la

Fig. 26



voiture au travail des forces de résistance

$$\frac{mv^2}{2} = mgkS,$$

on trouve le coefficient de résistance au déplacement

$$k = v^2/2gS.$$

Le compteur permet de déterminer la vitesse avec une erreur d'environ 2 km/h. En utilisant les formules de la théorie des erreurs, on peut trouver que pour une vitesse de 80 km/h et une distance de parcours de 600 m, l'erreur relative de la définition de k est

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{2\Delta v}{v} + \frac{\Delta S}{S} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2 \text{ km/h}}{80 \text{ km/h}} + \frac{30 \text{ m}}{600 \text{ m}} = 0{,}1 = 10\%,$$

ce qui n'est pas si mal.

75. Pour communiquer à la barre un mouvement uniforme ascendant sur le plan incliné, il faut lui appliquer une force F_{asc} égale à la somme de la force de frottement $F_{fr} = kP \cos \alpha$ et de la composante F_1 du poids de la barre, parallèle au plan. Conformément à la figure 26 on a :

$$F_{asc} = kP \cos \alpha + P \sin \alpha.$$

D'une façon analogue on obtient la valeur de la force F_{desc} qui communique à la barre un mouvement uniforme descendant

$$F_{desc} = kP \cos \alpha - P \sin \alpha.$$

En retranchant de la première équation la deuxième, on obtient :

$$F_{asc} - F_{desc} = 2P \sin \alpha,$$

d'où

$$\sin \alpha = \frac{F_{asc} - F_{desc}}{2P}.$$

Les forces F_{asc}, F_{desc} et P pouvant s'obtenir à l'aide d'un dynamomètre, cette expression permet de calculer $\sin \alpha$ et de trouver ensuite dans des tableaux la valeur de l'angle lui-même.

Lorsque la pente est faible, on peut se passer de tableaux, puisque pour de petits angles

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

si, bien sûr, l'angle α est exprimé en radians. Dans ce cas,

$$\alpha \approx \frac{F_{asc} - F_{desc}}{2P}.$$

En multipliant la grandeur obtenue par 57 degrés/radians on aura la valeur approchée de l'angle de pente en degrés.

76. Utilisons les conducteurs disponibles pour monter un circuit qui comprend la baladeuse et la batterie d'accumulateurs et approchons d'en bas la boussole de la partie rectiligne de l'un des conducteurs. L'aiguille aimantée tournera alors sous l'effet du champ magnétique. En connaissant le sens de rotation on peut appliquer la règle du tire-bouchon pour définir la direction du courant dans le circuit, puis les signes des bornes de l'accumulateur.

Pour résoudre le problème, la baladeuse n'est pas de rigueur puisque son rôle consiste seule-

ment à limiter le courant dans le circuit; or, la mise en circuit de l'accumulateur étant très brève, on peut le négliger.

77. Il faut fixer les conducteurs aux bornes de la batterie et placer leurs extrémités libres dans un verre d'eau. L'électrolyse de l'eau ainsi amorcée peut s'observer grâce aux bulles de gaz qui se forment aux extrémités des conducteurs immergés (pour intensifier le processus, il faut verser dans l'eau une goutte d'acide sulfurique).

Une molécule d'eau étant composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène seulement, alors que sous des pressions égales, des volumes égaux doivent contenir les mêmes quantités de molécules de gaz, pendant l'électrolyse il se dégage deux fois plus d'hydrogène. C'est pourquoi l'électrode où les bulles de gaz sont plus nombreuses est celle où se dégage l'hydrogène. Il n'est donc pas difficile d'établir la polarité du conducteur correspondant du fait que les ions hydrogène ont une charge positive et que ce gaz doit être dégagé par la cathode.

78. Connectons les conducteurs de cuivre aux bornes de sortie de l'accumulateur et enfonçons leurs extrémités libres dans la pomme de terre. En passant par cette dernière, le courant amorce l'électrolyse de l'eau qu'elle contient. Il en résulte que près du conducteur connecté à la borne négative de la batterie il se dégage de l'hydrogène, et près du conducteur connecté à la borne positive, de l'oxygène. L'interaction de l'oxygène avec le cuivre forme des oxydes et des hydroxydes dont les ions font colorer le voisinage du conducteur correspondant en bleu-vert. Pour l'autre conducteur la coloration ne sera pas observée.

Ainsi, le conducteur connecté à la borne positive de l'accumulateur se trouve là où la pomme de terre verdit.

79. Déterminons à l'aide d'un chronomètre le temps t nécessaire au cerceau pour descendre la route à partir de son état au repos et se déplacer d'une distance l donnée par le compteur de vitesse de la voiture (cette distance peut être calculée aussi d'après la longueur de la circonférence de la roue). Dans ces conditions, la diminution de l'énergie potentielle du cerceau est:

$$\Delta\Pi = mgh = mgl \sin \alpha,$$

où α est l'angle recherché. Cette diminution est égale à l'énergie cinétique acquise par le cerceau. Si ce dernier *glissait* sur le plan, son énergie cinétique serait donnée par la formule

$$T = mv^2/2,$$

où v est la vitesse du centre du cerceau et m la masse du cerceau. Or, pour le *roulement*, l'énergie cinétique est donnée par la somme de deux termes qui traduisent la part associée à la translation et la part définie par la rotation:

$$T = T_t + T_r.$$

Pour calculer l'énergie cinétique d'un cerceau qui roule il faut donc calculer celle de la translation, sans tenir compte de la rotation, puis, au contraire, calculer celle de la rotation, sans tenir compte de la translation, en considérant que le centre du cerceau est au repos, puis additionner les expressions obtenues.

En général, l'énergie cinétique d'un corps animé d'un mouvement de rotation est assez difficile à calculer, les vitesses des points se trouvant à des diverses distances de l'axe de rotation étant différentes. Mais pour le cerceau le problème se simplifie sensiblement du fait que tous les points se trouvent à la même distance de l'axe passant par son centre de gravité, et cette distance est égale au rayon du cerceau.

Si le centre du cerceau se déplace par rapport au sol avec une vitesse v, tous les points de sa jante se déplacent par rapport au centre à la même vitesse. Par conséquent, le deuxième terme de l'expression ci-dessus peut être mis sous la forme

$$T_r = \frac{m_1 v^2}{2} + \frac{m_2 v^2}{2} + \ldots + \frac{m_n v^2}{2} = \\ = \frac{v^2}{2}(m_1 + m_2 + \ldots + m_n) = \frac{mv^2}{2},$$

où m_i sont les masses des « points » isolés du cerceau dont la somme constitue la masse m du cerceau tout entier.

L'énergie cinétique totale s'écrit donc

$$T = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = mv^2.$$

En admettant que le cerceau soit animé d'un mouvement uniformément accéléré, on trouve sa vitesse terminale v après le parcours l d'après le temps t nécessaire à cet effet :

$$v = 2l/t,$$

et l'expression de l'énergie cinétique du cerceau devient

$$T = 4ml^2/t^2.$$

En égalant cette valeur à la perte de l'énergie potentielle, on obtient

$$mgl \sin \alpha = 4ml^2/t^2,$$

d'où l'on peut tirer $\sin \alpha$ de la pente de la route :

$$\sin \alpha = 4l/gt^2.$$

Dans cette expression toutes les valeurs sont soit connues, soit mesurables directement.

Il reste à ajouter que si la pente de la route est relativement faible, on peut appliquer, comme on le fait généralement, l'égalité approchée

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

(voir solution du problème n° 75).

80. Il faut suspendre les deux pendules l'un près de l'autre pour qu'on puisse les observer ensemble. Tirer les deux poids du même côté et lâchez-les simultanément. A l'instant initial les phases des oscillations coïncideront, mais avec le temps le pendule à période plus petite « devancera » l'autre pendule. Quelque temps plus tard, les pendules reprendront de nouveau leur état « en phase ».

Il est évident que si à ce moment le premier pendule effectue n oscillations, le second en fera une de moins. On peut donc écrire :

$$nT_1 = (n - 1)\, T_2,$$

où T_1 et T_2 sont les périodes du premier et du second pendule.

L'expression obtenue montre qu'en connaissant la période de l'un des pendules (donnée par l'énoncé) ainsi que n (compté pendant l'expérience) on peut trouver la période du deuxième pendule :

$$T_2 = \frac{n}{n-1} T_1 \quad \text{ou} \quad T_1 = \frac{n-1}{n} T_2.$$

81. Après avoir découpé des bandes étroites dans chaque sorte de papier on plonge leurs extrémités dans l'eau. L'eau monte le plus haut dans le papier où les pores sont les plus petits.

82. Appliquer au milieu de l'un des barreaux l'extrémité de l'autre. Si le premier est un aimant, le deuxième n'est pas attiré du fait que la ligne neutre passe généralement par le milieu d'un aimant rectiligne. Mais si l'attraction a lieu,

on peut déduire que le deuxième barreau, celui qui est appliqué, est aimanté.

On peut d'ailleurs aimanter un barreau rectiligne de façon qu'il ait au milieu un pôle, par exemple, le pôle Sud, et aux extrémités deux pôles Nord (un barreau de ce genre peut être considéré comme deux aimants appliqués l'un à l'autre par leurs pôles Sud). Dans ce cas il faut faire passer l'extrémité d'un barreau le long de l'autre. Si on observe alors une attraction continue, le premier barreau est un aimant du fait qu'il comporte obligatoirement un pôle à son extrémité. Mais si pendant le déplacement, l'attraction n'est observée qu'en certains points, c'est le deuxième barreau qui est aimanté.

83. Après avoir trouvé la masse de la bille à l'aide d'une balance et mesuré son volume avec le gobelet gradué, il est facile de calculer sa densité. Si cette dernière est inférieure à 2,7 g/cm³ (densité de l'aluminium), on peut être presque sûr que la bille comporte à l'intérieur une cavité.

Immergeons la bille dans un verre d'eau. Si la cavité est déplacée par rapport au centre, la bille se tiendra à la surface de l'eau (si sa densité moyenne est inférieure à celle de l'eau, cas d'une cavité suffisamment grande) ou descendra au fond de façon que la partie qui contient la cavité soit en haut de la bille.

84. Tournons le tube de Compton de 180° sur l'axe horizontal et observons le mouvement des particules dans le tube qui en résulte.

Supposons qu'au début la position verticale du tube ait été parallèle à la direction « Est-Ouest ». Avant la rotation, le liquide de la partie supérieure du tube se déplaçait vers l'Est autour du centre de la Terre à une vitesse plus grande que dans la partie inférieure. (Plus le rayon de rotation est grand et plus la vitesse linéaire est grande). Une fois le tube tourné, le

volume qui se déplaçait plus vite se trouve en bas et celui dont le déplacement était plus lent, se trouve en haut. Il en résulte une circulation lente du liquide dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (si on regarde le tube du côté Nord).

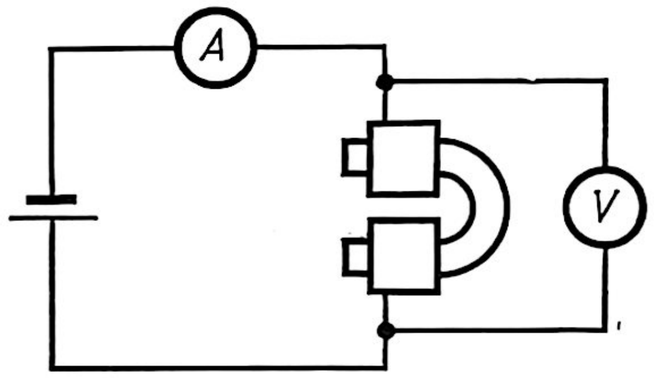
Plus le plan du tube s'écarte de la direction « Est-Ouest », plus la circulation est faible, et si le tube est orienté dans le sens « Nord-Sud », la circulation n'a pas lieu du tout. Par conséquent, pour définir la direction « Est-Ouest », il faut faire tourner plusieurs fois le tube en l'orientant chaque fois de façon différente, jusqu'à ce qu'on trouve la position dans laquelle la circulation du liquide est la plus intense.

85. En plaçant les deux matras devant une lampe de bureau, observons la marche des rayons à travers les deux liquides. Comme l'indice de réfraction de l'eau $n_1 = 1{,}33$ et de l'alcool $n_2 = 1{,}36$, après avoir passé le matras contenant de l'alcool les rayons se rassemblent plus près du matras que dans le cas du matras contenant de l'eau.

86. Le plus simple est de procéder de la façon suivante. Mesurer au chronomètre le temps pendant lequel le chariot, en se déplaçant sous l'action de la charge P placée sur le plateau de l'appareil, franchit un trajet déterminé, disons, du début de support à son extrémité. Retirons du chariot le corps étudié pour y placer des poids marqués de façon que le chariot parcoure le même trajet pendant le même temps. La masse totale des poids donne alors la masse du corps.

87. Un noyau de fer muni de deux bobines peut être considéré comme un transformateur usuel. Si l'une de ses bobines est connectée à la source de courant alternatif et si on mesure les tensions U_1 et U_2 des deux bobines, on peut calculer le *rapport* des nombres de spires dans

Fig. 27



les bobines d'après la formule

$$\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2}.$$

Toutefois, ces mesures ne donnent pas *séparément* les valeurs de n_1 et n_2. C'est pourquoi on enroule au-dessus des bobines existantes une bobine supplémentaire à nombre de spires n connu. Alors le rapport écrit ci-dessus peut être complété par un rapport qui comporte la tension U du bobinage supplémentaire:

$$\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2} = \frac{U}{n}.$$

Ensuite, on a

$$n_1 = \frac{U_1}{U} n \quad \text{et} \quad n_2 = \frac{U_2}{U} n.$$

Les grandeurs U_1, U_2 et U sont déterminées au voltmètre et n en comptant les spires de la bobine supplémentaire.

88. Après avoir monté le circuit schématisé sur la figure 27, il faut, en appliquant la loi d'Ohm, calculer d'après les indications du voltmètre U et de l'ampèremètre I la résistance R de la bobine de l'électro-aimant

$$R = U/I.$$

Ensuite, on mesure au micromètre le diamètre d du fil et calcule d'abord sa longueur

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{\pi d^2 U}{4\rho I},$$

puis la masse

$$m = DlS = \frac{\pi^2 d^4 UD}{16\rho I}.$$

Dans ces dernières formules, ρ est la résistivité du cuivre, D sa densité; ces grandeurs peuvent être tirées d'un aide-mémoire.

89. Supposons que la masse d'un tube capillaire vide définie avec une balance soit m_1. Aspirons dans le tube une certaine quantité de mercure (bien entendu, il ne faut pas le faire à la bouche, le mercure étant très dangereux, mais avec une poire en caoutchouc) et repesons-le. Supposons que la masse soit maintenant m_2. Par conséquent, la masse m de la colonne de mercure dans le capillaire est

$$m = m_2 - m_1.$$

D'autre part, m peut être exprimée en fonction de la longueur de la colonne de mercure l, de son diamètre d et de la densité du mercure D de la façon suivante:

$$m = D \frac{\pi d^2}{4} l.$$

Ces deux égalités conduisent à

$$d = \sqrt{\frac{4(m_2 - m_1)}{\pi D l}}.$$

Puisque la longueur de la colonne de mercure s'obtient facilement à l'aide de la règle, alors que la densité du mercure est fournie par les tableaux correspondants, la grandeur recherchée se calcule sans peine.

90. Soient deux disques de carton fixés sur l'axe du moteur à une distance l telle que leurs plans soient perpendiculaires à l'axe. En tirant pendant la marche du moteur dans le sens de l'axe, on fera dans les deux disques des trous

déplacés l'un par rapport à l'autre d'un angle

$$\varphi = \omega t = 2\pi nl/v,$$

où ω est la vitesse angulaire de rotation du moteur qui se calcule aisément d'après la fréquence de rotation n, t le temps nécessaire pour que la balle couvre la distance l entre les disques et v la vitesse recherchée de la balle.

L'égalité écrite ci-dessus donne

$$v = 2\pi nl/\varphi.$$

l se mesure au décamètre, l'angle φ au rapporteur et la fréquence de rotation du moteur est donnée.

91. D'après la loi de Hooke, avec des charges peu élevées (c'est-à-dire dans le domaine des déformations *élastiques*), l'allongement x du ressort est proportionnel à l'effort appliqué F:

$$F = kx,$$

où k est ce qu'on appelle le coefficient d'élasticité (ou coefficient de rigidité) qui dépend du matériau et des dimensions du ressort.

Supposons que sous l'action du poids marqué P_1 l'allongement du ressort fixé à un trépied est x_1, et celui dû à l'action du poids marqué P_2 est x_2. On a alors deux égalités

$$P_1 = kx_1, \quad P_2 = kx_2;$$

en les divisant terme à terme, on obtient:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{x_2}{x_1}, \quad \text{d'où} \quad P_2 = \frac{x_2}{x_1} P_1.$$

Les allongements x_1 et x_2 se mesurent à la règle, alors que P_1 est connu par hypothèse.

92. En plaçant la barre sur la planche, élevons l'une de ses extrémités jusqu'à ce que la barre commence à se déplacer. La figure 26 (p. 94) montre que l'effort F_1 qui tend à la déplacer dans un sens parallèle au plan est égal à $P \sin \alpha$. En même temps, la force de frottement de la barre sur la planche peut s'écrire

$$F_{fr} = kP \cos \alpha,$$

où P est le poids de la barre et k le coefficient de frottement recherché.

Dans le cas d'un mouvement uniforme, l'effort qui déplace la barre est égal à la force de freinage, c.-à-d.

$$P \sin \alpha = kP \cos \alpha,$$

d'où on a pour le coefficient de frottement

$$k = \operatorname{tg} \alpha = h/l.$$

Ainsi, pour calculer le coefficient de frottement, il suffit de mesurer h et l.

93. Pour résoudre le problème n° 75 on a trouvé les expressions des forces nécessaires pour communiquer à la barre un mouvement uniforme ascendant et descendant sur un plan incliné. Les voici:

$$F_{asc} = kP \cos \alpha + P \sin \alpha; \quad F_{desc} = kP \cos \alpha - P \sin \alpha.$$

En retranchant de la première équation la deuxième, on trouve l'expression qui permet de calculer $\sin \alpha$:

$$\sin \alpha = \frac{F_{asc} - F_{desc}}{2P}.$$

En additionnant ces mêmes expressions, on peut obtenir une relation pour le calcul de $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \frac{F_{asc} + F_{desc}}{2kP}.$$

En élevant les deux dernières expressions au carré et en les additionnat, on obtient:

$$1 = \left(\frac{F_{asc} - F_{desc}}{2P}\right)^2 + \left(\frac{F_{asc} + F_{desc}}{2kP}\right)^2,$$

d'où l'on tire le coefficient de frottement:

$$k = \frac{F_{asc} + F_{desc}}{\sqrt{4P^2 - (F_{asc} - F_{desc})^2}}.$$

Les forces F_{asc}, F_{desc} et P nécessaires pour le calcul se déterminent au dynamomètre.

94. Il convient de fixer la poulie à une certaine hauteur au-dessus du plancher (la visser au plafond, par exemple), faire passer le cordon et fixer aux extrémités de ce dernier le poids et le corps étudié. Pour les calculs ultérieurs, on a intérêt à placer d'abord ces deux objets à la même hauteur, comme le montre la figure 28. Ensuite on laisse le poids et le corps étudié se déplacer. Trois cas peuvent alors se présenter suivant la relation entre les masses du poids M_0 et du corps M_x:

a) Le système est au repos. Il en sera ainsi lorsque $M_x = M_0$. Le problème étant résolu, point n'est besoin de poursuivre les mesures.

b) Le poids descend et le corps monte. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que la masse du poids soit supérieure à celle du corps: $M_x < M_0$.

En appliquant le deuxième principe de la dynamique, cherchons l'accélération des deux corps:

$$a = \frac{M_0 g - M_x g}{M_0 + M_x} = \frac{M_0 - M_x}{M_0 + M_x} g.$$

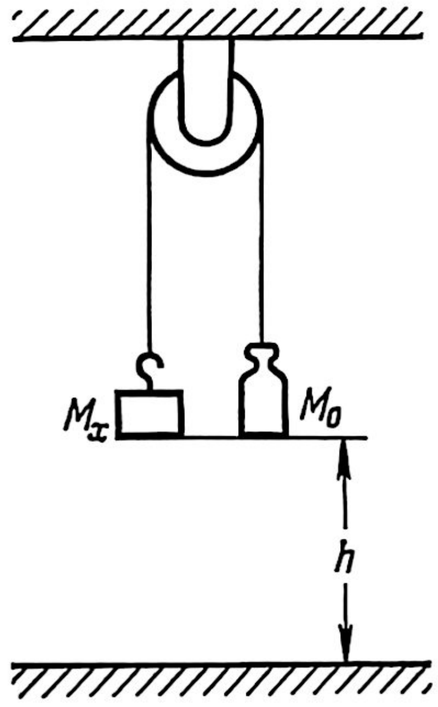
Le chemin parcouru en un temps t par le corps qui se déplace avec une accélération constante a, la vitesse initiale étant nulle, peut être calculé d'après l'équation

$$h = at^2/2.$$

En portant dans cette équation la valeur de l'accélération écrite ci-dessus, on obtient:

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_0 - M_x}{M_0 + M_x} gt^2.$$

Fig. 28



On peut en tirer que

$$M_x = \frac{gt^2 - 2h}{gt^2 + 2h} M_0.$$

La grandeur M_0 est donnée par les conditions du problème, g est une grandeur constante, alors que t est mesuré au chronomètre. Ainsi, pour résoudre le problème, il faut indiquer le moyen de calculer la longueur du trajet h parcouru par le poids et le corps en un temps t (il est commode de prendre pour ce trajet la distance au plancher, voir fig. 28). Dans ce but on peut appliquer la méthode proposée dans la solution du problème n° 34 pour définir la longueur, la largeur et la hauteur d'une chambre, qui se ramène à confectionner avec le fil et le plomb un « pendule mathématique » dont la longueur égale à la distance recherchée (dans le cas présent, à la distance entre le plomb ou le corps et le plancher) se calcule ensuite d'après la formule du pendule, la période T étant mesurée au chronomètre:

$$h = gT^2/4\pi^2.$$

c) Si $M_x > M_0$, les expressions de l'accélération du système et de la masse du corps étudié s'écrivent respectivement

$$a = \frac{M_x - M_0}{M_x + M_0} g \quad \text{et} \quad M_x = \frac{gt^2 + 2h}{gt^2 - 2h} M_0.$$

Toutes les grandeurs qui font partie de cette dernière expression sont ou bien connues, ou bien peuvent être déterminées par les méthodes déjà examinées.

Il reste à dire que dans les trois cas, pour obtenir une solution correcte il faut que le frottement sur l'axe de la poulie soit le plus faible possible, et pour les deux derniers cas, c.-à-d. b) et c), il faut également que la masse de la poulie, ou plus précisément son moment d'inertie, soit la plus petite possible.

95. Il faut échauffer la barre jusqu'à 100 °C dans une boîte d'eau placée sur le réchaud à alcool. Puis la barre est placée dans le calorimètre qui contient une quantité d'eau mesurée au préalable avec le gobelet gradué. Les températures initiale et finale de l'eau sont mesurées au thermomètre, après quoi l'équation du bilan thermique

$$m_1 c_1 (100° - t) = m_2 c_2 (t - t_1) + m_3 c_3 (t - t_1)$$

donne la masse de la barre m_1. Dans cette équation, m_2 et m_3 sont les masses de l'eau dans le calorimètre et du calorimètre lui-même, c_1, c_2 et c_3 les capacités thermiques de l'acier, de l'eau et du matériau dont est fait le calorimètre et t_1, t les températures initiale et finale de l'eau dans le calorimètre.

96. Dans ce cas, l'équation du bilan thermique (voir la solution du problème précédent) est de la forme

$$m_1 c_1 (t_x - t) = m_2 c_2 (t - t_1) + m_3 c_3 (t - t_1),$$

où t_x est la température recherchée. On la calcule

sans peine en résolvant cette équation. La masse de la barre m_1 est considérée comme connue ou se calcule suivant la méthode donnée par la solution du problème n° 95.

97. Bourrez le vase intérieur d'un des calorimètres de neige humide et placez-le sur le réchaud. Faites fondre la neige, chauffez l'eau ainsi obtenue (il doit y en avoir un peu moins de la moitié du vase) et faites la bouillir. Pendant que l'eau s'échauffe, refroidissez le vase intérieur du deuxième calorimètre à 0 °C en y plaçant pour un certain temps de la neige humide. Lorsque l'eau commence à bouillir, remplissez le deuxième calorimètre d'une portion fraîche de neige et placez-le sur la balance. Versez de l'eau du premier calorimètre jusqu'à l'obtention de l'équilibre de la balance. Ensuite, versez de l'eau bouillante dans la neige humide, brassez-les bien et mesurez la température du mélange. Les dernières opérations doivent être faites assez vite pour que les pertes de chaleur dans l'espace ambiant ne soient pas trop grandes. Maintenant on peut procéder aux calculs.

Désignons les masses de la neige humide et de l'eau bouillante versée dans cette neige par m, la température après leur brassage par θ, la capacité thermique de l'eau par C, la chaleur de fusion de la glace par λ et la teneur en glace de la neige humide (valeur recherchée) par K. Alors:

la quantité de chaleur nécessaire pour que fonde la glace contenue dans la neige humide est $K \cdot m \cdot \lambda$;

la quantité de chaleur nécessaire pour porter à la température θ l'eau de fusion de la glace et celle contenue auparavant dans la neige humide est $mC\theta$;

la quantité de chaleur dégagée par le refroidissement de l'eau bouillante depuis 100 °C à θ est mC $(100° - \theta)$.

Ensuite, de l'équation du « bilan thermique »

$$K \cdot m \cdot \lambda + mC\theta = C \cdot (100° - \theta)$$

on trouve la valeur qui nous intéresse

$$K = \frac{100 \cdot C - 2 \cdot C \cdot \theta}{\lambda}.$$

Voyons si le problème peut être résolu de cette façon quelle que soit la quantité de glace dans la neige humide; dans certains cas, la quantité d'eau bouillante sera-t-elle insuffisante pour faire fondre toute la glace (le thermomètre montrera alors 0 °C indépendamment de la quantité initiale de la glace)?

Pour répondre à cette question, il faut résoudre l'équation du bilan thermique par rapport à θ:

$$\theta = \frac{100 \cdot C - K \cdot \lambda}{2 \cdot C};$$

remarquons que pour résoudre le problème la méthode décrite convient seulement dans le cas où θ est supérieur à 0 °C.

En résolvant l'inégalité

$$\frac{100 \cdot C - K \cdot \lambda}{2 \cdot C} > 0,$$

on trouve la condition nécessaire:

$$K < \frac{100 \cdot C}{\lambda}.$$

En portant dans le second membre les valeurs numériques de la capacité thermique de l'eau et de la chaleur de fusion de la glace, on obtient

$$\frac{100° \cdot 4{,}2 \text{ kJ (kg} \cdot \text{degrés)}}{336 \text{ kJ/kg}} = 1{,}25.$$

K ne pouvant pas dépasser l'unité par définition, le problème est toujours résoluble.

98. Montons un circuit de l'accumulateur, de l'ampèremètre et de la résistance connue R

et mesurons le courant I_1 qui le parcourt. Ce courant

$$I_1 = \frac{\mathscr{E}}{R + r}, \qquad (1)$$

où $\mathscr{E}$ est la force électromotrice de l'accumulateur, r sa résistance intérieure. Ensuite, au lieu de la résistance R connue, intercalons dans le circuit une résistance R_x inconnue et mesurons de nouveau le courant. La nouvelle valeur du courant I_2 peut être exprimée par l'équation

$$I_2 = \frac{\mathscr{E}}{R_x + r}. \qquad (2)$$

Par conséquent, pour définir trois grandeurs $\mathscr{E}$, r et R_x on a seulement deux équations. On sait qu'un tel système ne possède pas de solution unique et que pour calculer les inconnues il faut avoir encore une équation. Bon nombre d'élèves ont des difficultés à la composer. Or, ce n'est pas difficile du tout. Il suffit de mettre les résistances recherchée et connue soit en série soit en parallèle et déterminer l'intensité du courant qui apparaît dans ces conditions. Pour un montage en série:

$$I_3 = \frac{\mathscr{E}}{R + R_x + r}, \qquad (3)$$

et en parallèle:

$$I_4 = \frac{\mathscr{E}}{\frac{RR_x}{R + R_x} + r}. \qquad (4)$$

En complétant les équations (1) et (2) par la relation (3) ou (4), on obtient un système de trois équations qui permettent de calculer les trois inconnues $\mathscr{E}$, r et R_x. En particulier, on obtient:

$$R_x = \frac{I_2 (I_3 - I_1)}{I_1 (I_3 - I_2)} R$$

si on utilise les équations (1), (2) et (3), ou

$$R_x = \sqrt{\frac{I_1 (I_4 - I_2)}{I_2 (I_4 - I_1)}} R$$

si le système est composé des équations (1), (2) et (4).

99. Pour calculer la vitesse moyenne d'un cycliste, il faut connaître le trajet parcouru et le temps. Le trajet parcouru se définit à la règle sur la carte (dans les cas courants, toute carte porte une échelle). Quant à la pile Grenet, elle nous permettra de mesurer le temps.

Le fait est que le fonctionnement de toute pile électrique s'accompagne de la dissolution dans l'électrolyte du matériau de l'électrode négative. La pile Grenet, par exemple, donne lieu à la réaction suivante:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2.$$

La masse m du zinc qui passe dans la solution peut se calculer d'après la première loi de Faraday suivant le temps de fonctionnement de la pile t et l'intensité du courant I qui parcourt le circuit dont fait partie la pile:

$$m = kIt,$$

où k est l'équivalent électrochimique du zinc.

On en tire la solution du problème. Il convient d'utiliser des conducteurs pour monter un circuit composé de la pile, du rhéostat et de l'ampèremètre en pesant au préalable l'électrode de zinc. Ce circuit est fermé à l'instant de départ du cycliste et coupé à l'instant où il revient. Le zinc est alors pesé à nouveau pour déterminer la durée du voyage d'après la différence des masses $m = m_1 = m_2$, l'intensité du courant I et l'équivalent électrochimique pris dans les tableaux.

100. Il faut retenir que dans un circuit de courant alternatif, tout condensateur se comporte

comme une résistance, dont la valeur est inversement proportionnelle à la capacité

$$R = \frac{1}{\omega C}$$

(ω est la pulsation du courant alternatif). Ainsi, la résistance totale du schéma monté de condensateurs dans un circuit de courant alternatif est proportionnelle à $1/C_g$. Si la résistance du circuit composé de résistances identiques montées de la même façon que les condensateurs est égale à R_g, on peut écrire la proportion:

$$\frac{1}{C} : \frac{1}{C_g} = R : R_g,$$

d'où l'on tire

$$C_g = \frac{RC}{R_g}.$$

La capacité du condensateur est connue, alors que R et R_g peuvent se calculer d'après la loi d'Ohm en montant un circuit de l'accumulateur, des résistances, de l'ampèremètre et du voltmètre.

On peut aboutir à la même conclusion un peu autrement. Dans un montage en série des résistances, leurs valeurs s'additionnent, et dans un montage en série des condensateurs, s'additionnent les grandeurs inverses de leurs capacités. Inversement, dans un montage en parallèle des résistances, on additionne les grandeurs inverses des résistances, alors que dans un montage en parallèle des condensateurs, ce sont leurs capacités qui s'additionnent. Par conséquent, quelle que soit la combinaison des montages en série ou en parallèle, la grandeur $1/C$ se comporte de la même façon que la grandeur R, d'où l'on déduit l'égalité précédente:

$$\frac{1}{C} : \frac{1}{C_g} = R : R_g.$$

101. La résistance R d'un morceau de fil de cuivre égal en longueur à la hauteur de la salle peut être établie d'après la loi d'Ohm en montant un circuit qui a pour source de courant un accumulateur et pour secteur extérieur (charge) le morceau du conducteur considéré. Si la lecture de l'ampèremètre monté en série avec ce conducteur est I, alors que le voltmètre monté en parallèle enregistre la différence de potentiel U, on a

$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{S},$$

où S est la section transversale du conducteur et ρ la résistivité du cuivre.

D'autre part, la masse m de ce morceau de fil définie à l'aide de la balance peut être exprimée en fonction de sa longueur l, de sa section transversale S et de la densité du cuivre D de la façon suivante :

$$m = DlS.$$

En multipliant ces égalités, on obtient :

$$\frac{mU}{I} = \rho D l^2,$$

d'où

$$l = \sqrt{\frac{mU}{\rho DI}}.$$

Les grandeurs I, U et m sont fournies par l'expérience, alors que les valeurs de ρ et de D sont prises dans un aide-mémoire. De la même façon on établit la longueur et la largeur de la salle, puis on calcule son volume.

Si la chute de tension sur le morceau de fil égal à la longueur de la salle est faible et s'il est difficile de la mesurer avec le voltmètre, il faut intercaler dans le circuit un morceau plus grand que la longueur de la salle d'un certain nombre entier de fois (à cet effet il suffit de mesurer la longueur de la salle avec le fil et prendre cette longueur plusieurs fois).

102. Le problème précédent montre qu'en pesant le morceau de fil de longueur égale à la hauteur de la salle et en prenant la densité du cuivre dans un aide-mémoire, on peut calculer le produit de la longueur du morceau par sa section transversale :

$$lS = \frac{m}{D}.$$

Ensuite, en augmentant progressivement la masse des poids suspendus au fil, on détermine la charge critique P_{cr} qui entraîne la rupture du fil. Cette charge critique est directement proportionnelle à la section transversale du fil :

$$P_{cr} = m_{cr} g = \sigma S,$$

où σ est la charge de rupture du fil de cuivre (voir problèmes n^{os} 40 et 66) dont la valeur peut être trouvée dans un aide-mémoire.

En multipliant ces dernières expressions terme à terme on obtient après la réduction par S :

$$m_{cr} g l = \frac{m\sigma}{D},$$

d'où

$$l = \frac{m}{m_{cr} D g}.$$

Ensuite, on trouve de la même façon la longueur et la largeur de la salle, puis son volume.

Malheureusement, la charge de rupture du cuivre varie sensiblement d'une nuance à l'autre. C'est pourquoi les résultats ne sont corrects que si la charge de rupture du fil en cuivre est connue avec une précision suffisante.

103. La fréquence des battements entre le diapason et le tuyau d'orgue est

$$N = \nu_d - \nu$$

où ν_d est la fréquence du son émis par le diapason et ν la fréquence du son émis par le tuyau d'orgue. La première grandeur est constante par hypothèse, alors que ν varie en fonction de la température de l'air dans le local.

En effet, la longueur λ de l'onde sonore émise par le tuyau d'orgue peut être exprimée en fonction de la vitesse de propagation du son v et de sa fréquence ν de la façon suivante :

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

D'autre part, pour un tuyau d'orgue ouvert, la longueur d'onde du ton principal

$$\lambda = 4l,$$

où l est la longueur du tuyau. Des deux dernières égalités on tire :

$$\nu = \frac{v}{4l}. \qquad (*)$$

Les ondes sonores se propagent dans l'air à une vitesse de même ordre que celle de ses molécules à une température donnée. L'énergie cinétique de ces dernières étant directement proportionnelle à la température absolue T

$$\frac{mv^2}{2} \sim T,$$

la vitesse des molécules, et donc la vitesse du son, est directement proportionnelle à la racine carrée de T :

$$v \sim \sqrt{T}.$$

On en tire la relation entre la vitesse du son v à une certaine température T et sa valeur v_0 pour $T_0 = 0$ °C :

$$\frac{v}{v_0} = \sqrt{\frac{T}{T_0}}.$$

En tenant compte de l'égalité (*) qui traduit la relation entre la fréquence du son émis par le tuyau d'orgue et la vitesse de propagation des ondes sonores, on peut mettre la dernière expression sous la forme

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \sqrt{\frac{T}{T_0}},$$

où ν_0 est la fréquence du tuyau d'orgue à 0 °C, égale, d'après les conditions du problème, à 440 Hz.

En portant la valeur de la fréquence du tuyau d'orgue à une température T donnée par cette expression dans l'expression initiale de la fréquence d'oscillations, on obtient :

$$N = \nu_d - \nu_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}},$$

et à une température T dans le laboratoire, on aura :

$$T = T_0 \left(\frac{\nu_d - N}{\nu_0}\right)^2 = T_0 \left(\frac{\nu_d - N}{\nu_d}\right)^2.$$

Cette expression se vérifie sans peine. En portant $N = 0$, on obtient $T = T_0$. En effet, pour $T = 0$ °C les fréquences du diapason et du tuyau d'orgue coïncident.

104. Il faut casser la lame de la scie en deux (il vaut mieux qu'elle soit déjà inutilisable). Si la lame est aimantée, les deux parties s'attirent l'une l'autre.

105. On trouve d'abord la masse m de toute la plaque. Puis à l'aide d'une équerre on construit sur cette plaque un rectangle de côtés connus, on le découpe avec des ciseaux et on détermine sa masse m_0 en le pesant sur la balance. Si l'épaisseur de la plaque est partout la même, sa masse m est d'autant de fois supérieure à la masse m_0 que l'aire S de la plaque tout entière est plus

grande que l'aire S_0 du rectangle découpé :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{S}{S_0},$$

d'où

$$S = S_0 \frac{m}{m_0}.$$

L'aire S_0 se détermine aisément à l'équerre.

Si on ne veut pas couper la plaque, il faut tracer son contour sur une feuille de carton ou de papier compact, découper la figure obtenue et effectuer sur cette figure toutes les opérations qui viennent d'être décrites.

106. Si lors de la solidification la densité diminue, un morceau solide de même substance jeté dans la masse fondue flotte à la surface. La glace, par exemple, dont la densité est 1,1 fois inférieure à celle de l'eau, se comporte de cette façon. Si au contraire un morceau de fer solide se trouve noyé dans la masse fondue, cela signifie que la densité du fer augmente avec la solidification.

Dans le premier cas la solidification entraîne l'augmentation du volume de la substance, dans le deuxième, son volume diminue.

107. Divisons la plaque en rectangles suivant le pointillé de la figure 29, *a*. Le centre de gravité

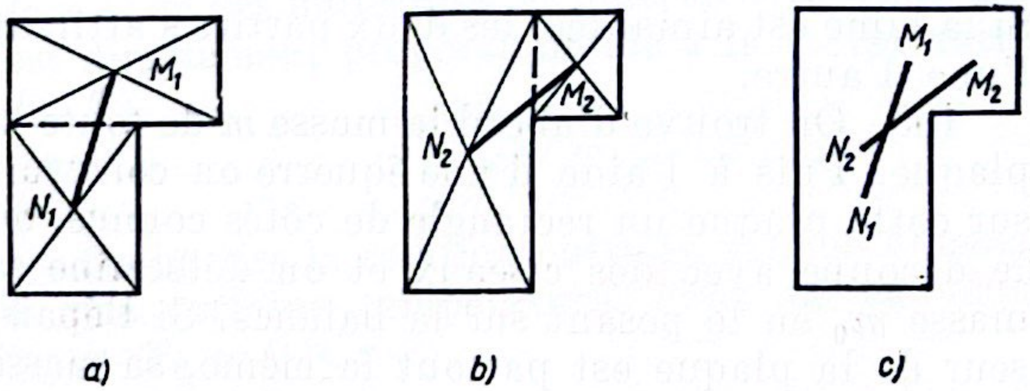


Fig. 29

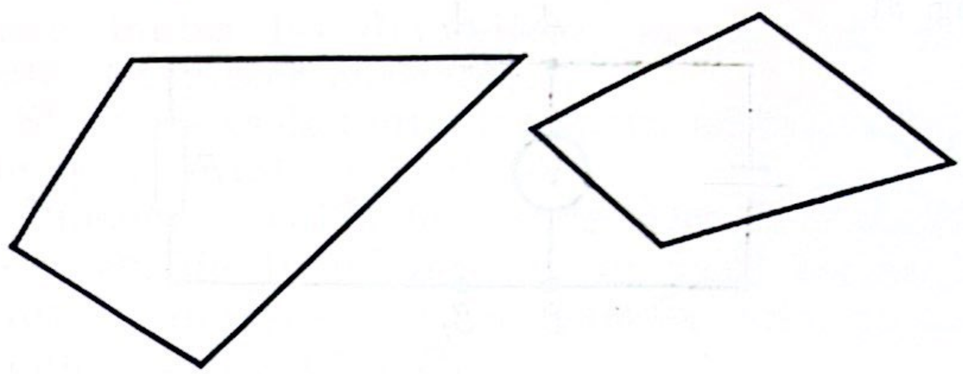


Fig. 30

du rectangle sera en M_1, à l'intersection des diagonales. D'une façon analogue nous trouvons le centre e gravité N_1 du deuxième rectangle. Le centre de gravité de la plaque appartient donc à la droite M_1N_1.

En raisonnant de la sorte on trouve que le point recherché doit appartenir à la droite M_2N_2, où M_2 et N_2 sont les centres de gravité des rectangles de la figure 29, *b*. Mais si le centre de gravité appartient simultanément aux deux droites, il doit coïncider avec leur point d'intersection (fig. 29, *c*).

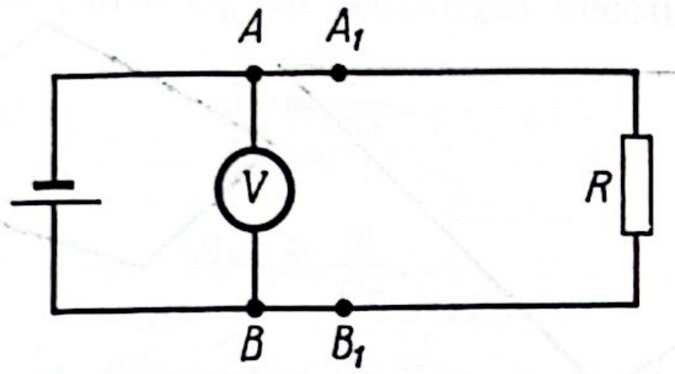
Essayez maintenant, en appliquant la méthode établie, de définir les centres de gravité des quadrilatères irréguliers de la figure 30.

108. Pour résoudre ce problème il faut se rappeler la règle de la main gauche qui définit la direction de la force appliquée à un conducteur placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique.

Si la lampe est alimentée en courant alternatif, l'aimant qu'on y approche fera osciller le filament de la lampe et ses contours deviendront flous. Si le courant est continu, le contour du filament restera net, ce dernier ne s'écartant que quelque peu de la position initiale.

109. Il faut couper le circuit d'alimentation de la lampe à poche pour intercaler à tour de rôle les deux bobines.

Fig. 31



La résistance de la bobine d'intensité est négligeable et lorsqu'on la met en circuit, l'incandescence de la lampe ne change pratiquement pas. Inversement, la résistance de la bobine de tension est très grande et lorsqu'elle est intercalée, la lampe ne s'allume pas du tout.

110. Fixons le voltmètre d'abord aux points A et B (voir fig. 31), puis aux points A_1 et B_1 qui se trouvent un peu plus à droite. Supposons que le voltmètre indique respectivement U et U_1.

Si $U > U_1$, la source de courant est à gauche des points A et B : en passant des points A et B aux points A_1 et B_1, les lectures du voltmètre diminuent par suite de la chute de tension dans les secteurs AA_1 et BB_1.

Si $U < U_1$, la source de courant se trouve à l'extrémité droite du circuit. Dans ce cas, les indications du voltmètre augmentent par suite de la chute de tension dans ces mêmes secteurs.

Le problème se résout de la même façon pour les circuits de courant continu et alternatif, il faut seulement choisir un voltmètre de type convenable. Il importe également que sa sensibilité soit suffisamment élevée pour pouvoir enregistrer une variation en général faible de la différence de potentiel lors du passage de la position AB à la position A_1B_1.

111. Il faut tirer de la première caisse une pièce, de la deuxième, deux, de la troisième, trois, etc., jusqu'à la dernière caisse où l'on prend toutes les dix pièces, et puis on pèse toutes les pièces ensemble.

Si les pièces de toutes les caisses étaient bonnes, leur poids total serait P_1.

Puisque le poids de chaque pièce de la n-ième caisse est de 10 g inférieur au poids requis, le poids P_2 indiqué par la balance sera de $10n$ grammes inférieur à P_1 :

$$P_1 - P_2 = 10\ n.$$

On en tire n, c.-à-d. le numéro de la caisse contenant les pièces rebutées :

$$n = \frac{(P_1 - P_2)\ g}{10\ g}.$$

112. Si on utilise pour l'éclairage une lampe à fonctionnement périodique (lampe-éclair), dont la fréquence des décharges est égale au nombre de tours de la broche, la pièce se présentera toujours dans la même position et sa surface sera bien visible. Pour alimenter la lampe, il faut un générateur à variation continue de fréquence.

Au lieu d'une lampe-éclair et d'un générateur de fréquence variable, on peut employer une lampe brillante usuelle en laissant passer ses rayons par une fente radiale dans le disque de carton fixé sur l'arbre d'un moteur électrique dont on peut changer la vitesse.

L'effet qui par suite d'un éclairement intermittent permet de voir comme fixes les corps animés d'un mouvement rotatif est dit stroboscopique. Le problème suivant est également consacré à certaines de ses applications.

113. Traçons une circonférence au compas sur une feuille de carton et découpons-la dans la feuille. Portons sur le disque ainsi obtenu un trait radial et collons le disque à l'arbre du moteur de façon qu'il soit perpendiculaire à cet arbre ;

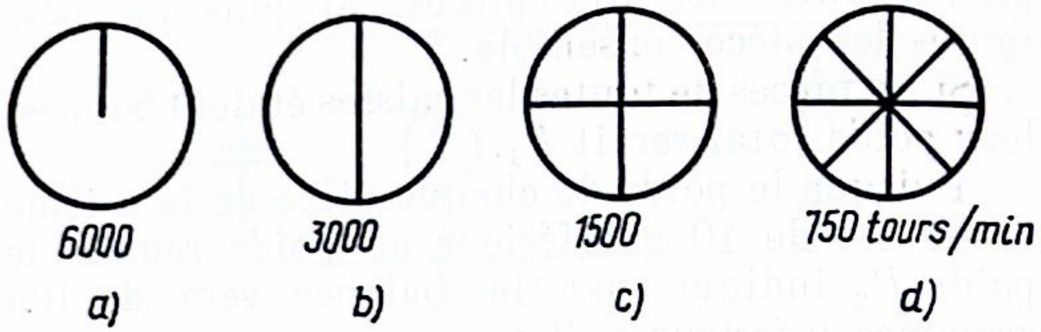


Fig. 32

mettons le moteur en marche et branchons la lampe à néon dans un réseau de courant alternatif. Dans un tel réseau, une lampe à néon s'allume 100 fois par seconde (6 000 fois par minute). Si entre les décharges le moteur fait exactement un tour (c.-à-d. si sa fréquence de rotation est de 6 000 tours par minute), le trait porté sur le disque se présentera tout le temps dans la même position, c.-à-d. il semblera fixe malgré la rotation (fig. 32, *a*).

Si la fréquence de rotation diminue de moitié, entre deux décharges de la lampe l'arbre du moteur ne fera qu'un demi-tour et on verra le trait prolonger celui qu'on a vu pendant la décharge précédente. On verra alors un trait plus long, coupant le disque tout entier suivant le diamètre (fig. 32, *b*). Lorsque la vitesse de rotation sera de 1 500 tours par minute, on verra sur le disque une croix (fig. 32, *c*) et pour une vitesse de rotation de 750 tours par minute, deux croix tournées de 45° l'une par rapport à l'autre.

Il faut dire que l'image de la figure 32, *a* s'observera non seulement dans le cas où entre deux décharges consécutives de la lampe le disque fait un tour, mais aussi s'il effectue pendant ce temps deux, trois tours, etc. (c.-à-d. si la fréquence de rotation est de 12 000, 18 000 tr/mn, etc.). L'image de la figure 32, *b* aura lieu également si les fréquences de rotation sont de 9 000,

15 000 tr/mn, etc. (entre les décharges, le disque fait 1,5; 2,5 tours, etc.). Il se forme une croix (fig. 32, *c*) pour des fréquences de 1 500, 4 500, 7 500 tr/mn, etc., et deux croix (fig. 32, *d*) pour des fréquences de 750, 2 250, 3 750 tr/mn, etc. Compte tenu de ce qui vient d'être dit, la vitesse de rotation doit être augmentée progressivement, en approchant de la vitesse nécessaire « d'en bas », à partir de zéro.

114. Tracez à la craie un trait le long de l'axe de l'arbre en rotation. La composition de deux mouvements à la surface de l'arbre forme une spirale. En multipliant le nombre de spires par le temps de déplacement de la craie, on obtient la vitesse de rotation de l'arbre. Par exemple, si en 5 secondes on obtient 20 spires, la fréquence de rotation est de 4 tours par seconde ou de 240 tr/mn.

115. L'astronaute doit projeter un objet quelconque du côté opposé à la fusée (s'il n'en a pas sous la main, la situation peut devenir tragique). En vertu du principe de la conservation de la quantité du mouvement que nous avons déjà appliqué dans la solution du problème n° 61, l'astronaute acquiert alors une vitesse dirigée vers la fusée

$$V = \frac{m}{M} v,$$

où M et m sont les masses de l'astronaute et de l'objet et v la vitesse de ce dernier.

Comme on le sait, la fusée elle-même se déplace dans l'espace de cette façon, en rejetant dans une direction les produits de combustion et en se déplaçant dans la direction opposée grâce à l'effet ainsi produit.

116. La tâche peut être remplie de deux façons. Considérons-les à tour de rôle.

a) Supposons que nous ayons placé sur le plateau d'une balance à bascule le corps étudié

de masse m_1 et sur l'autre plateau, le poids de masse m_2. Le satellite, de même que tous les corps qu'il porte (y compris le corps à peser et le poids) ayant dans le champ gravitationnel de la Terre la même accélération (ils ne cessent de « tomber » sur la Terre), la balance sera en état d'équilibre neutre.

Pourtant, l'équilibre sera compromis si la balance est animée d'un mouvement uniformément accéléré par rapport au satellite, car pour communiquer une même accélération a à des corps de masses différentes les forces appliquées doivent être différentes:

$$F_1 = m_1 a$$

et

$$F_2 = m_2 a.$$

Il n'est pas difficile non plus d'obtenir au moins approximativement pour un mouvement uniformément accéléré que la flèche de la balance ne s'écarte pas du trait zéro: à cet effet, il faut que les masses du corps et des poids soient égales.

b) On peut utiliser également un dynamomètre. Si on y suspend le corps étudié et si l'on communique au système une certaine accélération constante a, l'index du dynamomètre enregistrera une force

$$F_1 = m_1 a.$$

Ensuite, il faut remplacer le corps par un poids de masse m_2 connue et communiquer au dynamomètre un mouvement de même accélération a. La lecture du dynamomètre sera alors

$$F_2 = m_2 a.$$

En divisant les deux dernières égalités terme à terme on obtient:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2},$$

d'où

$$m_1 = m_2 \frac{F_1}{F_2}.$$

Dans le cas d'une balance à ressort, il est plutôt difficile de réaliser l'égalité des accélérations nécessaire.

On peut essayer de le faire en tournant le dynamomètre avec le corps suspendu, puis avec le poids, à une vitesse angulaire constante; pour ce faire, il faudrait probablement avoir un chronomètre. Aussi, est-il préférable d'employer, si c'est possible, deux dynamomètres en fixant à l'un d'eux le corps étudié, et à l'autre, le poids de masse connue; ensuite, en tenant les deux dynamomètres dans la même main, les faire tourner simultanément pour leur communiquer le même mouvement accéléré.

Pour résoudre ce problème, nous utilisons le fait que le mouvement accéléré d'un système est équivalent à un champ des forces de gravitation. L'équivalence des forces gravitationnelles et des forces intervenant sur les corps dans des systèmes animés d'un mouvement accéléré (forces d'inertie) est l'un des principes fondamentaux de la théorie de gravitation établie par Albert Einstein dans sa théorie de relativité générale (1915). C'est pourquoi dans un vaisseau spatial ou dans un satellite commandé, il suffit de mettre en marche les moteurs pour qu'apparaisse une « gravité artificielle » et que les balances d'un type *quelconque* puissent fonctionner.

117. Si un vaisseau spatial se meut autour d'une planète les moteurs débranchés, la force unique F_g qu'il subit est celle de l'attraction de la planète

$$F_g = G \frac{Mm}{R^2},$$

où G est la constante gravitationnelle, M la masse de la planète, m la masse du vaisseau et R sa distance du centre de la planète.

Si la hauteur où se tient l'engin n'est pas grande, on peut considérer R égal au rayon de la planète (on suppose qu'elle est d'une forme quasi sphérique).

Exprimons la masse de la planète en fonction de son rayon et de sa densité moyenne D :

$$M = VD = \frac{4}{3}\pi R^3 D,$$

et portons la valeur obtenue de M dans la formule précédente :

$$F_g = \frac{4}{3}\pi GRmD.$$

Puisque le vaisseau se déplace sur une orbite circulaire, il subit la force centripète qui peut s'écrire

$$F_{cp} = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R = m\frac{4\pi^2}{T^2}R,$$

où v est la vitesse linéaire du vaisseau spatial, ω sa vitesse angulaire et T sa période de révolution autour de la planète.

Puisque le rôle de la force centripète est joué par l'attraction gravitationnelle, les seconds membres des deux dernières expressions peuvent être égalés, et on obtient alors pour la densité :

$$D = 3\pi/GT^2.$$

Ainsi, après avoir déterminé à l'aide d'une montre la période de révolution du vaisseau autour de la planète, on peut calculer sa densité moyenne.

Pour les satellites artificiels de la Terre placés sur une orbite circulaire, cette période est généralement d'environ une heure et demie (5 400 s). En portant cette valeur dans la dernière

formule, on obtient la densité moyenne de la Terre :

$$D = \frac{3 \cdot 3{,}14}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ m^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \cdot (5\,400\ \text{s})^2} \approx 5000\ \text{kg/m}^3.$$

La station automatique « Luna-16 » placée le 17 octobre 1970 sur une orbite circulaire autour de la Lune avait une période de 1 h 59 mn (7 140 s), d'où on a pour la densité moyenne de la Lune

$$D = \frac{3 \cdot 3{,}14}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2) \cdot (7\,140\ \text{s})^2} \approx 3000\ \text{kg/m}^3.$$

En réalité, les densités de la Terre et de la Lune sont plus grandes d'environ 10 %. La différence est due au fait que les satellites se déplacent généralement assez haut, et il faut tenir compte de la différence entre les rayons de la planète et de l'orbite. Mais si dans la formule ci-dessus on porte les valeurs de T qui correspondent aux déplacements sur les orbites rasant la surface terrestre (ce qui est pratiquement impossible à cause de la résistance de l'air) ou lunaire, et qui sont égales respectivement à 1 h 24 mn et à 1 h 48 mn, on obtient des densités correctes égales à 5 500 kg/m³ et 3 360 kg/m³.

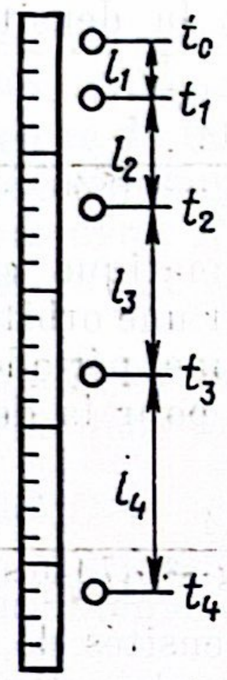
Pour une orbite élevée la formule de la densité est de la forme

$$D = \frac{3\pi}{GT^2}\left(1 + \frac{h}{R}\right)^3,$$

où h est la hauteur de l'orbite. En utilisant cette formule, on peut obtenir des valeurs correctes de la densité même dans le cas d'une orbite élevée.

118. Plaçons la règle verticalement sur le fond de drap noir et éclairons-la d'un faisceau de rayons lumineux intermittents émis par la lampe et passant par la fente dans le disque animé d'un mouvement de rotation uniforme. Ouvrons

Fig. 33



l'obturateur de l'appareil photographique et laissons tomber la bille de façon qu'elle passe devant la règle. Sur le cliché obtenu on verra la règle et plusieurs taches claires qui correspondent à la position de la bille en chute aux instants où elle était éclairée par la lumière. Les distances l_1, l_2, l_3, etc., entre ces positions se calculent aisément d'après les traits de la règle (fig. 33).

La première tache claire correspond à l'instant où le temps passé depuis le départ est t_0; pendant ce temps, la bille a couvert la distance

$$S_0 = \frac{gt_0^2}{2}.$$

La deuxième fois la bille a été photographiée après un temps t_1 depuis le départ, lorsqu'elle a franchi la distance

$$S_1 = \frac{gt_1^2}{2}.$$

La troisième position correspond au temps t_2 et au trajet parcouru S_2:

$$S_2 = \frac{gt_2^2}{2},$$

etc. Il est clair que

$$l_1 = S_1 - S_0 = \frac{gt_1^2}{2} - \frac{gt_0^2}{2} = \frac{g}{2}(t_1^2 - t_0^2),$$

$$l_2 = S_2 - S_1 = \frac{g}{2}(t_2^2 - t_1^2).$$

De plus,

$$t_1 = t_0 + \tau \text{ et } t_2 = t_1 + \tau = t_0 + 2\tau,$$

où τ est l'intervalle entre deux instants successifs de l'éclairement de la bille, égal à la période de rotation du moteur électrique.

Ensuite, nous pouvons écrire:

$$l_1 = \frac{g}{2}[(t_0+\tau)^2 - t_0^2] = \frac{g}{2}(2t_0\tau + \tau^2),$$

$$l_2 = \frac{g}{2}[(t_0+2\tau)^2 - (t_0+\tau)^2] = \frac{g}{2}(2t_0\tau + 3\tau^2).$$

En retranchant la première équation de la deuxième on obtient:

$$l_2 - l_1 = g\tau^2,$$

d'où

$$g = \frac{(l_2 - l_1)}{\tau^2}.$$

Les grandeurs l_1 et l_2 se lisent sur la règle, alors que τ est défini suivant la fréquence de rotation connue du moteur.

119. Il suffit de déterminer au dynamomètre la force d'attraction P^* exercée par la planète sur le poids marqué (son poids sur cette planète). Alors, l'accélération de la gravité g^* est donnée par la relation

$$g^* = \frac{P^*}{m},$$

où m est la masse du poids marqué donnée par l'énoncé.

120. En utilisant la balance à ressort mesurer P^*, autrement dit ce que pèse le poids marqué

sur cette planète. En vertu de la loi de l'attraction universelle, la force P^* s'exprime en fonction de la masse du poids marqué m, la constante gravitationnelle G, la masse de la planète M et son rayon R :

$$P^* = G\frac{Mm}{R^2}.$$

On en tire pour la masse de la planète :

$$M = \frac{P^* R^2}{Gm}.$$

G est la constante gravitationnelle dont la valeur peut être prise dans un aide-mémoire, P^* est fourni par l'expérience et m et R sont donnés.

121. On confectionne un « pendule mathématique » avec un fil et un plomb. Il faut déterminer à l'aide d'un chronomètre sa période T. Ensuite, d'après la formule du pendule, on peut calculer g^*, l'accélération de la gravité sur la planète :

$$g^* = \frac{4\pi^2 l}{T^2},$$

la longueur du pendule l étant donnée.

D'autre part, en vertu de la loi de l'attraction universelle, l'accélération de la gravité peut s'écrire :

$$g^* = \frac{P^*}{m} = G\frac{M}{R^2},$$

où M est la masse de la planète, R son rayon et G la constante gravitationnelle.

En égalant les seconds membres des équations, on obtient pour la masse de la planète :

$$M = \frac{4\pi^2 R^2 l}{GT^2}.$$

Le rayon de la planète s'exprime sans difficulté au moyen de la longueur C de l'équateur

de la planète :

$$R = \frac{C}{2\pi},$$

d'où l'on tire la densité moyenne D de la matière de la planète :

$$D = \frac{M}{V} = \frac{6\pi^2 l}{GT^2 \cdot C}.$$

La valeur de la densité D se calcule sans peine, puisque toutes les grandeurs de cette expression sont connues.

122. Pour évaluer la longueur de la suspension on peut la comparer à la taille de l'astronaute qui se trouve tout près ; elle était environ d'un mètre.

La période d'oscillation définie à la montre était de 5 s. En appliquant ensuite la formule du pendule

$$T = 2\pi\sqrt{l/g},$$

on peut obtenir pour l'accélération de la gravité

$$g^* = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = \frac{4 \cdot 3{,}14^2 \cdot 1}{5^2} \approx 1{,}6 \text{ m/s}^2,$$

valeur très proche de celle obtenue par des méthodes plus précises.

123. Après avoir confectionné une bobine avec du fil métallique, il faut connecter ses extrémités au galvanomètre. Si le champ magnétique de la planète est assez fort, le galvanomètre enregistrera pendant la rotation de la bobine les impulsions du courant induit produit par les variations du flux magnétique passant par le plan de la bobine. En principe, cette méthode permet de déceler non seulement un champ magnétique, mais aussi la grandeur et la direction du vecteur d'induction magnétique.

Ce principe est à la base de la construction de certains magnétomètres utilisés dans la pratique.

124. Outre la loi de la conservation de la quantité du mouvement que nous avons appliquée

pour résoudre les problèmes nos 61 et 115, il existe également la loi de la conservation du *moment* cinétique. En vertu de cette loi, l'astronaute qui fait tourner un disque ou un autre objet entre ses mains tourne lui-même dans le sens opposé (il va sans dire que c'est le cas si d'autres objets n'y font pas obstacle). Lorsque l'astronaute tournera d'un angle requis, la rotation de l'objet doit cesser.

Et que faire si l'astronaute n'a rien sur lui? Dans ce cas, en vertu de la loi de la conservation de la quantité du mouvement, il ne pourra pas changer la grandeur et la direction de sa vitesse (par exemple, par rapport à la fusée); or, la loi de la conservation du moment cinétique ne lui interdit pas de modifier son orientation. Pour tourner, disons, dans le sens des aiguilles d'une montre (si on regarde l'astronaute d'« en haut »), il lui suffit d'effectuer les mouvements suivants: étendre le bras droit du côté droit, puis le serrer contre la poitrine, l'étendre le long du corps, puis de nouveau l'étendre du côté droit, etc.

Ce problème rappelle le problème bien connu du chat qui tombe. On sait qu'un chat possède une capacité extraordinaire d'atterrir sur ses pattes même dans le cas où il tombe les pattes en l'air. Une prise de vue « au ralenti » (ou plutôt accélérée!) montre qu'au moment de la chute, le chat se met à tourner rapidement la queue; il en résulte que son corps tourne dans le sens opposé à la rotation de la queue. Le chat arrête le mouvement lorsque ses pattes se trouvent en bas.

L'exemple fort simple qui suit est une bonne illustration de la capacité des organismes vivants d'exécuter des rotations sans aucune aide extérieure.

Supposons dans l'air un serpent étendu dans le sens OO_1 le dos en haut (fig. 34, *a*). Les lois

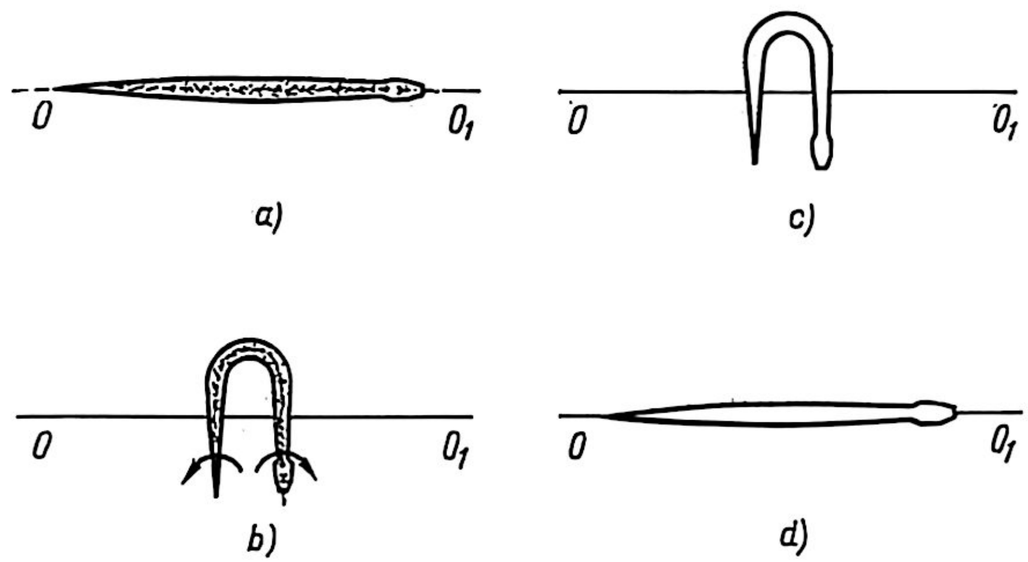


Fig. 34

de la nature et la structure de son corps ne l'empêcheraient pas de prendre la position de la figure 34, *b*. Il peut en tournant ensuite les parties avant et arrière du corps dans les sens indiqués par les flèches mettre le ventre en haut (fig. 34, *c*), puis s'étendre le long de la droite OO_1 (fig. 34, *d*). Cette suite de mouvements le fera tourner réellement de 180° autour de son axe longitudinal. (L'exemple est, certes, artificiel, puisque dans les cas courants, le serpent se déplace sur le sol et pour se retourner il utilise les forces de frottement. Toutefois, si jamais il tombait d'une très grande hauteur, il pourrait procéder d'après la description ci-dessus.)

125. Il existe plusieurs méthodes susceptibles de révéler aux Vénusiens la rotation de leur planète sur elle-même et le sens de cette rotation.

Ils pourraient, par exemple, étudier le comportement d'un pendule. En 1851 le physicien français Léon Foucault a utilisé un pendule pour démontrer la rotation de la Terre. Les pendules prévus à cet effet sont composés d'un poids massif fixé à un fil de quelques dizaines de mètres (le plus long pendule du monde est celui de la cathédrale d'Isaac à Léningrad, qui est de 98 m;

le pendule de Foucault établi au Panthéon à Paris avait une longueur de 67 m); le poids est fixé au support à l'aide d'une suspension à cardan ou d'un palier horizontal rendant possible l'oscillation du pendule dans un plan vertical quelconque. La rotation de la Terre fait que le plan d'oscillation du pendule tourne lentement par rapport aux repères sur la surface terrestre.

L'attraction terrestre qui s'exerce sur le poids du pendule et la force de tension du fil se situent dans le plan d'oscillation et ne peuvent pas provoquer sa rotation. Pour un observateur extra-terrestre, la rotation du plan d'oscillation s'explique par la rotation de la surface terrestre avec les repères par rapport auxquels on définit la position de ce plan. Au pôle de la Terre, où la position du plan d'oscillation reste invariable par rapport aux étoiles, un observateur terrestre découvrirait que le plan d'oscillation tourne à une vitesse angulaire égale à celle de la Terre, mais dirigée dans le sens opposé.

Aux points situés entre les pôles, la position du plan d'oscillation du pendule, passant par le fil à plomb, ne peut rester fixe par rapport aux étoiles et dans une certaine mesure qui dépend de la latitude participe à la rotation de la Terre. La rotation du plan d'oscillation du pendule est donc respectivement plus lente par rapport aux repères sur la surface terrestre. A l'équateur, cet effet n'a pas lieu du tout.

La rotation du plan d'oscillation du pendule de Foucault peut être expliquée également du point de vue de l'observateur terrestre. Dans ce cas il faut faire appel aux forces de Coriolis dont il a été question dans la solution du problème n° 57.

La troisième variante de la solution du problème prévoit l'utilisation d'un gyroscope, toupie massive animée d'une rotation rapide, placée dans une suspension à cardan.

Si le centre de gravité d'un gyroscope coïncide avec le centre de la suspension, alors que les forces de frottement sont pratiquement nulles (un gyroscope de ce type est dit équilibré ou libre), la direction de son axe reste invariable par rapport aux étoiles «fixes». Dans le cas où le centre de gravité du gyroscope ne coïncide pas avec le centre géométrique de la suspension, l'axe du gyroscope décrit dans l'espace un cône (phénomène qui s'appelle précession). Pour un gyroscope d'une masse de 1 kg qui tourne avec une fréquence de 30 000 tr/mn, le déplacement du centre de gravité de 1 μ provoque une précession à une vitesse de 1 degré/h. La Terre tournant à une vitesse angulaire bien plus grande (15 degrés/h), ce gyroscope révèle sans peine le mouvement de rotation de la Terre, ce qui a été démontré pour la première fois en 1852 par ce même Foucault. Bien entendu, plus la rotation de la planète est lente, plus l'équilibrage du gyroscope doit être précis et plus le frottement sur les axes de suspension doit être faible.

À NOS LECTEURS

Les Editions Mir vous seraient très reconnaissantes de bien vouloir leur communiquer votre opinion sur le contenu de ce livre, sa traduction et sa présentation, ainsi que toute autre suggestion.

Notre adresse:

Editions Mir, 2, Pervi Rijski péréoulok, Moscou, I—110, GSP, U.R.S.S.

DANS LA MÊME COLLECTION

Ouvrages parus :

LA VIE DEMAIN — TRAGÉDIE OU HARMONIE !
par I. Adabachev

L'ORIGINE DE L'HOMME
par M. Nestourkh

TOUT SUR LE CERVEAU
par B. Serguéev

A paraître

LE MONDE DES BALEINES ET DES DAUPHINS
par A. Tomiline

Ce petit livre contient des problèmes relatifs aux branches les plus diverses de la physique générale, qui exigent du lecteur, d'une part, la connaissance des notions, l'intuition de la physique et l'imagination requise pour appliquer les connaissances tirées des manuels. Pour vérifier la solution [et pour ceux qui n'ont pas réussi à l'obtenir] on donne une description détaillée de la marche à suivre.

Les ouvrages de ce type ont avant tout pour but de développer chez les élèves le mode de pensée physique.

Celui que nous soumettons à l'attention du lecteur présente de l'intérêt pour de larges milieux : il sera utile aux élèves, surtout à ceux qui se passionnent pour la physique ; les enseignants des écoles secondaires et professionnelles en tireront également profit. De nombreux problèmes peuvent être utilisés pour l'organisation de concours de physique récréative.

V. LANGUÉ

Expériences et astuces de la physique